

РЕФЕРАТ

Работа изложена на 74 страницах, она содержит 5 разделов, 24 иллюстраций, 8 таблиц и 30 источников в списке ссылок.

Объектом исследования являются защитные просветляющие покрытия.

Предмет работы – Просветляющие оптические покрытия для солнечных элементов космического назначения.

Цель работы - изучить свойства защитных и просветляющих покрытий для кремниевых фотоэлектрических преобразователей космического назначения повышенной радиационной стойкости в условиях реальных и доступных в Украине технологий.

В первом разделе представлен обзор литературы, в котором описывается Фотоэлектрические преобразователи: Технология изготовления, основные параметры и критерии качества.

Во втором разделе описано радиационное воздействие на солнечные батареи.

В третьем разделе представлены просветляющие оптические покрытия.

В четвертом описаны материалы и методы нанесения оптических покрытий.

Пятый раздел посвящен исследованиям радиационной стойкости просветляющих покрытий.

Как следует из полученных результатов, при помощи однослойных антиотражающих покрытий из Si_3N_4 , CeO_2 , TiO_2 и ITO можно существенно снизить отражение от поверхности солнечных элементов, что в свою очередь может привести к повышению их КПД.

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ABSTRACT

The work is presented on 74 pages, it contains 5 sections, 24 illustrations, 8 tables and 30 sources in the list of links.

The object of the study is a protective anti-glare coating.

Subject of work - Enlightening optical coatings for solar cells for space purposes.

The aim of the work is to study the properties of protective and antireflection coatings for silicon photoelectric converters for space purposes with increased radiation resistance under real and accessible technologies in Ukraine.

The first section presents a literature review that describes Photoelectric converters: Manufacturing technology, basic parameters and quality criteria.

In the second section, the radiation effect on the solar panels.

The third section of the anti-reflective optical coatings.

In fourth materials and methods of application of optical coatings.

The fifth section is the study of the radiation resistance of coated coatings.

As follows from the obtained results, using single-layer antireflection coatings made of Si₃N₄, CeO₂, TiO₂ and ITO can significantly reduce the reflection from the surface of solar cells, which in turn can lead to an increase in their efficiency.

ENLARGEMENT OPTICAL COATINGS FOR SOLAR ELEMENTS OF SPACE
APPLICATION

РЕФЕРАТ

Робота викладено на 74 сторінках, вона містить 5 розділів, 24 ілюстрацій, 8 таблиць і 30 джерел в списку посилань.

Об'єктом дослідження є захисні покриття, що просвітлюють.

Предмет роботи - Просвітлюючі оптичні покриття для сонячних елементів космічного призначення.

Мета роботи - вивчити властивості захисних і просвітлюючих покриттів для кремнієвих фотоелектричних перетворювачів космічного призначення підвищеної радіаційної стійкості в умовах реальних і доступних в Україні технологій.

У першому розділі представлено огляд літератури, в якому описується Фотоелектричні перетворювачі: Технологія виготовлення, основні параметри і критерії якості.

У другому розділі радіаційної вплив на сонячні батерей.

У третьому розділі просвітлюючі оптичні покриття.

У четвертому матеріали і методи нанесення оптичних покриттів.

П'ятий розділ дослідження радіаційної стійкості просвітлюючих покриттів.

Як впливає з отриманих результатів, за допомогою одношарових антиотражаючим покриттів з Si_3N_4 , CeO_2 , TiO_2 і ІТО можна істотно знизити відображення від поверхні сонячних елементів, що в свою чергу може привести до підвищення їх ККД.

Просвітлювати оптичні ПОКРИТТЯ ДЛЯ сонячних ЕЛЕМЕНТІВ космічного ПРИЗНАЧЕННЯ

Содержание

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ.....	6
ВСТУПЛЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА	8
1.1. Кремниевые солнечные элементы. Исторический обзор	8
1.2. Фотоэлектрические преобразователи – основные компоненты фотовольтаики	9
1.3. Конструкция солнечного элемента и его зонная диаграмма.....	13
1.4. Этапы изготовления	16
1.5. Критерии качества изготовления СЭ	19
РАЗДЕЛ 2. РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ .	22
2.1. Специфика механизмов радиационного воздействия	22
2.2. Воздействие космической радиации на солнечные батареи космических аппаратов.....	25
2.3. Радиационное повреждение СБ	29
2.4. Методы радиационных испытаний материалов космической техники .	33
РАЗДЕЛ 3. ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ.....	38
3.1. Типы покрытий и их назначение	38
3.2. Просветляющие покрытия в оптике.....	39
3.3. Требования к прозрачным защитным покрытиям	43
РАЗДЕЛ 4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	46
4.1. Методы изготовления оптических покрытий	46
4.2. Оксиды	52
4.3. Оксид индия.....	57
4.4. Нитрид кремния.....	58
4.5. Спектральные характеристики оксида титана и олова	59

РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ	63
5.1. Имитация радиационной обстановки соответственных поясов Земли на параметры ФЭП	63
5.2. Воздействие потоков электронов на ВАХ ФЭП.....	65
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	70
ПРИЛОЖЕНИЯ	

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

СП – солнечный преобразователь

ФЭП – фотоэлектрический преобразователь

СЭ – солнечный элемент

СБ – солнечная батарея

КПД – коэффициент полезного действия

РС – радиационная стойкость

КА – космический аппарат

ПП – просветляющее покрытие

$U_{\text{х.х.}}$ — напряжение холостого хода

$I_{\text{к.з.}}$ — ток короткого замыкания

ВСТУПЛЕНИЕ

При работе солнечных батарей в космосе в течение длительного периода времени (несколько лет) происходит постепенная деградация их основных параметров из-за воздействия различных факторов космического пространства .

На геостационарных орбитах (800 – 7000 км) наибольшую опасность для СБ представляют ионизирующие излучения – электроны и протоны радиационных поясов Земли, протоны солнечных вспышек, а также электромагнитное излучение Солнца, особенно УФ-излучение и мягкий рентген солнечных вспышек.

На низких околоземных орбитах (600 – 800 км) основными агрессивными факторами являются атомарный кислород и УФ-излучение.

Традиционным методом защиты солнечных батарей от радиации является пассивная защита, основанная на поглощении материалом защитного покрытия энергии излучения любого типа.

Помимо высокой эффективности поглощения, покрытия должны обладать высокой радиационно-оптической устойчивостью, чтобы в процессе полёта космического аппарата ухудшение их оптических свойств не привело к оптической деградации СБ [1].

Многолетние исследования показали, что деградация космических СБ под действием радиационного облучения существенно зависит от параметров орбиты космического аппарата (КА). Для низкоорбитальных КА деградация СБ из кремния и гетероструктур GaAs-GaAlAs составляет около 25% и 5% в течение 5 лет пребывания КА на орбите. Для КА на геостационарных орбитах деградация выше - 35% (Si) и 15% (GaAs) в течение 15 лет на орбите. Для радиационно-опасных орбит (7500 км при угле наклона около 50°), деградация оставляет более 50% (Si) и 20% (GaAs) в течение 5 лет на орбите.

Основным защиты ФЭП от радиационного повреждения является установка на них оптических прозрачных покрытий. Одновременно они выполняют функции терморегулятора. Материалом для таких покрытий служат, главным образом, плавленый кварц, либо стекло.

Эффективность прозрачной защиты основана на том, что ею сильно «срезаются» или вообще не пропускаются к полупроводнику частицы малых энергий, которых особенно много в спектре радиационных поясов Земли. К тому же именно частицы малых энергий наиболее разрушительно действуют на солнечные элементы, уменьшая их КПД.

Основная трудность практического решения этой проблемы состоит в том, что, кроме защиты от повреждающего действия радиации, оптические покрытия должны обладать высокими просветляющими и теплорегулирующими свойствами. Они должны уменьшать коэффициент отражения в рабочей области спектра и предохранять солнечные элементы от перегрева путем увеличения интегрального коэффициента собственного теплового излучения поверхности ε до значений в пределах 0,8 – 0,9. Необходимость просветления рабочей поверхности вызвана высоким коэффициентом отражения (35 – 40%) чистой полированной поверхности солнечных элементов в области спектральной чувствительности 0,4 – 1,1 мкм; это означает, что без уменьшения потерь на отражение не могут быть получены солнечные элементы с высоким КПД.

Основные типы просветляющих защитных покрытий, которые в наше время нашли наиболее широкое применение: Al_2O_3 , ITO, Si_3N_4 , Ta_2O_5 , Ti , ZnS. В данной работе исследовано влияние радиационного облучения кремниевых солнечных элементов потоком электронов при использовании 4-х видов покрытий: нитрида кремния, оксида титана, оксида церия и ITO, экспериментальным путем была определена относительная деградация фотоэлектрических преобразователей.

1.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА

1.1. Кремниевые солнечные элементы.

Кремниевый СП был изобретен в 1953 г. сотрудниками Bell Laboratories, когда уже ощущалась потребность в фотоэлектрическом преобразовании энергии.

В это время Чален занимался разработкой источников энергии для систем дальней связи, а Фуллер использовал диффузию для создания кремниевых *p-n*-переходов. Пирсон при исследованиях выпрямителей, которые были изготовлены по технологии Фуллера, обнаружил их чувствительность к свету и предложил решение проблемы фотоэлектрического преобразования энергии.

Испытывая диоды Пирсона, изготовленных на основе кремниевого *p-n*-перехода, при солнечном освещении был получен КПД $\approx 4\%$, т. е. более чем в 5 раз превысило ранее известные кремниевые ФЭП. Однако вследствие высокой диффузионной способности атомов Li устройства обладали некоторой нестабильностью даже при комнатной температуре. В последствии Фуллером была усовершенствована технология диффузии бора, и в 1954 г. получен стабильный кремниевый СЭ с КПД = 6% [Chapin e. a., 1954].

Первое практическое применение СЭ было осуществлено в 1955 г. при испытаниях 9-ваттной батареи для системы питания телефонного ретранслятора, который установили в штате Джорджия (США). Батарея проработала шесть месяцев – что несомненное техническое достижение.

С началом эры спутников был задан новый импульс для продолжения исследований в этой области. Первые солнечные ФЭП использованы в космосе на спутнике США Авангарда-1 17 марта 1958 г. Радиопередатчик этого спутника, получающий питание от СБ, передавал сигналы в течение 8 лет.

Цены на кремниевые СЭ начали быстро падать в связи с развитием технологии, а КПД их возрос до 15 – 17%, при нулевой воздушной массе (АМО).

В последние годы наблюдается тенденция улучшения характеристик серийно

выпускаемых кремниевых СЭ, главным образом благодаря уменьшению потерь носителей заряда, созданных коротковолновой частью солнечного спектра в слое *n*-типа проводимости, увеличения напряжения холостого хода V_{oc} (благодаря изменению уровня легирования) и повышения РС [2].

1.2. Фотоэлектрические преобразователи – основные компоненты фотовольтаики

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) «фотогальванические ячейки» - полупроводниковые фотоэлементы, предназначенные для преобразования светового излучения в видимом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне в электрический ток с помощью явления внутреннего фотоэффекта. ФЭП выполняют преобразование энергии по схеме: энергия оптического излучения → электрическая энергия. Основной характеристикой ФЭП является эффективность фотоэлектрического преобразования или коэффициент полезного действия (КПД), который для имеющихся на сегодняшний день технологических промышленных ФЭП лежит в пределах от 13 % до 19 %, а в лабораторных разработках достигает величины 39 – 43% .

Солнечная батарея или модуль – некоторое количество одиночных ячеек ФЭП, которые механически объединены в одной конструкции и электрически соединены для получения определенного уровня электрической мощности с установленными уровнями рабочих тока и напряжения.

К преимуществам солнечных фотоэнергетических систем можно отнести:

- доступность и неисчерпаемость солнечного излучения в качестве источника энергии;
- теоретически полная экологическая безопасность для окружающей среды (существует небольшая вероятность нагрева атмосферы над фотоэлектростанцией);
- экономичность процесса использования ФЭП;
- минимальный уровень планового технического обслуживания и высокая надежность (около 25 – 50 лет для качественных фотоэлементов, с потерей

по мощности до 80% от начальной).

- Несмотря на преимущества солнечных фотоэлектрических систем, у них есть и недостатки:
- зависимость от погоды, времени суток и времени года, и как следствие – необходимость аккумуляции энергии;
- сравнительно высокая стоимость конструкции на сегодняшний день (в 1 – 5 \$ / 1Вт мощности всей системы), но этот показатель постоянно снижается, учитывая широкое внедрение ФЭП в современном мире;
- необходимость периодической очистки поверхности от пыли и атмосферных осадков.

Несмотря на некоторые недостатки, преимущества от процесса получения солнечной электроэнергии значительно больше, что было оценено мировыми производителями современных технологий. Сейчас в мире существует около 700 компаний – производителей солнечных панелей для промышленного и бытового секторов.

Исторически первые ФЭП были разработаны еще в 1883 г. электриком из Нью-Йорка американцем Чарльзом Фриттсом, который изготовил фотоэлементы из селена, преобразующие световое излучение в видимом спектре в электричество и имевшие КПД 1 – 2%. В 1954 г. в лаборатории компании "Bell Telephone" создали кремниевый фотоэлектрический элемент с КПД 4%, потом эффективность достигла 11%. В 1958 г. небольшие (1 Вт) фотоэлектрические батареи обеспечивали электроэнергией радиопередатчик американского космического спутника "Авангард".

В современном мире наиболее распространенным является метод производства кремния с использованием процесса и реактора Сименс (Siemens-Reactor). Сименс-процесс – это процесс химического осаждения поликремния с термической газовой фазы (chemical vapour deposition – CVD). В этом процессе U-образные слитки поликремния получают водным восстановлением трихлорсилана при высокой температуре $T = 2500 - 3000^{\circ} \text{C}$. При этом поликремний осаждается на травильные стержни размером 2000x100 мм массой до 200 кг, размещенные в

Сименс-реакторе куполообразной формы. Такие слитки нарезаются на пластины толщиной 100 – 300 мкм, к которым в дальнейшем технологическом процессе подсоединяют электрические проводники. Так формируются единичные ячейки – ФЭП, из которых в дальнейшем комбинируются солнечные панели. Исходным сырьем для производства поликристаллического кремния является диоксид кремния. Диоксид кремния широко распространен в природе в виде песка, кварца и глины. В 2008 г. различные модификации Сименс-процесса использовались более чем на 90% действующих мощностей производства поликремния в мире.

В отдельных случаях в лабораторных условиях получены СЭ эффективностью от 40,7 до 43%. Одни из лучших результатов эффективности фотоэлектрического преобразования с КПД = 42.6% показывают ФЭП на основе гетероструктур GaAs (галлий арсенид) с оптическими концентраторами на линзах Френеля и функционируют в спектральном диапазоне 0,55 – 3,7 мкм. Энергетические возможности таких ФЭП составляют до 260 Вт/м при интенсивности светового излучения 1 кВт / м. Следует отметить, что в большинстве серийных ФЭП и солнечных панелей на их основе этот показатель составляет 160 – 200 Вт/м в стандартных условиях STC (Standart Test Conditions). За 2010 – 2011 годы особое внимание уделялось нанотехнологическим методам производства ФЭП.

Можно также отметить, что интеграция нанотехнологий в солнечные фотоэлементы позволит достичь принципиально новых физических и механических свойств, например таких, как построение абсолютно эластичных фотоэлементов в виде клейких тонких пленок, распечатки ячеек на фотобумаге на обычном принтере с использованием специальных полупроводниковых кремниевых чернил. Такие элементы по эффективности на единицу площади будут конкурировать с промышленными панелями со значительно большим весом и критичностью к условиям инсталляций.

На данный момент мировые исследовательские организации, такие как Эриа, Mimich Photovoltaic Research Institute, которые занимаются проблемами повышения эффективности и рабочих характеристик солнечных ячеек, делают акцент на нанотехнологических методах интеграции в твердые растворы кремния примесей в

виде наноточек, нанонитей и нанопроводников, что позволяет достичь в лабораторных условиях высоких значений эффективности с КПД $> 40 - 44\%$ и высокой надежности работы фотогальванических ячеек. Но пока эти технологии не получили широкого внедрения за счет высокой сложности промышленного оборудования для выращивания таких твердотельных структур и высокой стоимости. Но с уверенностью можно утверждать, что порог КПД в 50% для кремниевых СБ (как тонкопленочных, так и поли- и монокристаллических) будет преодолен благодаря использованию нанотехнологических примесей других полупроводников – в виде квантовых точек, трубок и других форм объектов с размером 1 – 10 нм .

В настоящее время широкое распространение получили 3 вида ФЭП и СБ на их основе :

- ФЭП на основе монокристаллического кремния;
- ФЭП на основе поликристаллического кремния;
- тонкопленочные ФЭП на основе аморфного кремния (в виде тонкой пленки Si).

В большинстве экономически дешевых ФЭП используется аморфный кремний, что позволяет достигать КПД до 12 – 14%. В качественных ФЭП, из которых строят промышленные солнечные энергосистемы, используется монокристаллический или поликристаллический кремний с технологическим КПД 14 – 16% (табл. 1.1). Разница между монокристаллическими и поликристаллическими ФЭП составляет 2 – 3% по КПД, но за счет того, что поликристаллические фотопластинки более толерантны к косым и не ортогональным световым лучам (лучше воспринимают рассеянный и угловой свет), средняя выработка в этих типах ФЭП практически одинакова, как и их стоимость в последних коммерческих марках.

Таблица 1.1 - Максимальные значения КПД кремниевых солнечных фотоэлементов в серийном производстве

Тип ФЭП для солнечных батарей	КПД фотоэлектрического преобразования, %
Si (кристаллический)	18,7
Si (поликристаллический)	17,3
Si (тонкопленочный)	13,6
InTeCd (тонкопленочный)	10,4

Соответственно каждый из 3 видов полупроводниковых материалов для солнечных батарей имеет свои преимущества и недостатки. Обобщенно их можно свести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 - Преимущества и недостатки типов фотоэлектрических преобразователей

Тип ФЭП	Преимущества	Недостатки	Область использования
ФЭП на основе монокристаллического кремния	- высокий КПД (17 – 19 %); - высокая надежность (25-50 лет службы); - стабильность параметров на протяжении длительного времени	- более высокая стоимость (1,1 - 3,3\$/Вт); -низкая технологичность; -большая чувствительность к уровню и углу источника света; -высокая стоимость получения и энергозатратность технологии изготовления	1) профессиональные солнечные энергосистемы; 2) солнечные электростанции; 3) системы питания космических аппаратов; 4)высококачественные частные солнечные системы
ФЭП на основе кристаллического кремния	-низкая стоимость (0,8-1,3\$/Вт); -высокая технологичность - стабильность	-немного ниже КПД (15–17 %); -меньшая стабильность параметров	1)широко распространенные качественные солнечные энергосистемы; 2)малые

	параметров		электростанции; 3)покрытия крыш домов; 4)фотоэлектрические бытовые приборы
Тонкопленочные ФЭП на основе аморфного кремния	-высокая технологичность -низкая стоимость (0,8-1,4\$/Вт)	-низкий КПД (8–14 %); -нестабильность параметров ; -низкая надежность	1) более дешевые частные энергосистемы; 2)системы светодиодного бытового освещения; 3) бытовые приборы

Каждый модуль солнечной батареи состоит из 36, 72 или 96 отдельных элементов ФЭП. В зависимости от КПД материала различные типы солнечных панелей будут иметь различные рабочие площади для получения одного для всех условного значения мощности. Промышленные батареи собираются из отдельных элементов, соединяются проводами, после чего закрываются стеклянными пластинами и полимерными пленками для защиты. Тонкопленочные элементы выпускают уже в готовых матрицах, иногда даже в готовых герметизированных корпусах, обеспечивающих автоматическое позиционирование ячеек ФЭП.

СБ из аморфного кремния монтируют реже в профессиональных системах, основная причина – слишком низкие КПД и надежность. Но эти СБ имеют также и некоторые преимущества по сравнению с кристаллическим кремнием: меньшая толщина (активный слой в 100 раз тоньше, чем кристаллический); тонкопленочные ФЭП могут принимать рассеянный и слабый солнечный свет (работа в затемненных местах).

При этом цена батареи составляет около 1 – 2 \$ на Вт номинальной мощности. При промышленной генерации электричества с помощью фотоэлементов цена за кВт/ч составит 0,15-0,20 дол. По мнению Европейской Ассоциации фотовольтаики EPIA (European Photovoltaics Association), до 2020 г. стоимость электроэнергии, производимой солнечными батареями, снизится до уровня менее 0,10 € за кВт /ч для промышленных установок и менее 0,15 € за кВт/ч – для установок в жилых домах [3].

1.3. Конструкция солнечного элемента

На рис. 1.1 схематически показаны поперечный разрез и вид сверху СЭ на основе n - p -перехода в Si. Основа элемента - пластина толщиной 170 –200 мкм из монокристалла Si. Толщина пластин выбирается скорее исходя из критериев технологичности, чем из требований полного поглощения света.

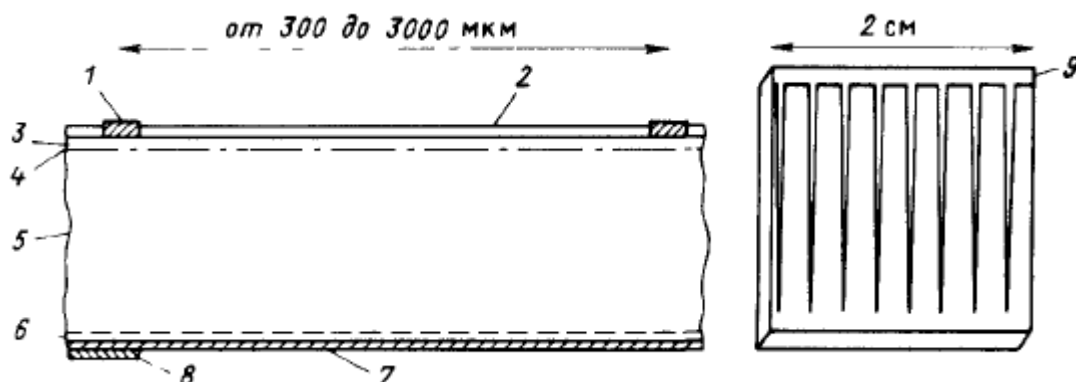


Рисунок 1.2 – Геометрия солнечного Si элемента:

1 – лицевой токосъемный контакт (многослойная система Ti Pd - Ag припой); 2 – ПП; 3 – слой n -типа толщиной 0,2 мкм; 4 – слой объемного заряда толщиной 0,45 мкм; 5 – база p – типа толщиной 180 мкм; 6 – p^+ -слой толщиной 0,45 мкм; 7 – тыльный контакт; 8 –шина токосъемная; 9 –токосъемная сетка.

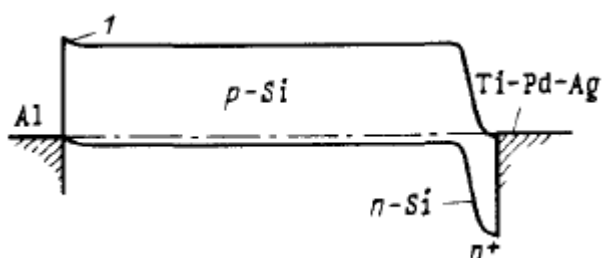


Рисунок 1.3 – Энергетическая зонная диаграмма типичного кремниевого СЭ; толщина n -слоя увеличена: 1 – электрическое поле вблизи тыльного контакта.

Слой n-типа толщиной 0,4–0,5 мкм создают диффузией, затем наносят электрические контакты и припой. Зонная диаграмма СЭ приведена на рис. 1.3, а параметры типичного элемента на основе n^+p-p^+ -структуры следующие.

Параметры "фиолетового" солнечного элемента

p^+ -слой	Легирующая примесь	Al
	Толщина, мкм	0,55
	τ_e , мкс	0,45
	L_n , мкм.....	1-8
Базовый слой Легирующая примесь В		
p-типа	Толщина, мкм	200
	$p, \text{см}^{-3}$	10^{16}
	$\mu_{p>} \text{см}^2/(\text{В-с})$	320
	$\mu_{\eta} \text{см}^2/(\text{В-с})$	1250
	ρ , Ом-см	2-3,5
	τ_e , мкс	6-40
	L_n , мкм.....	100—200
	$S^{*2}, \text{см}/\text{с}$	$0,3 \cdot 10^3$
	$S^{*3}, \text{см}/\text{с}$	10^6
	Диффузионный Легирующая примесь	P
n^+ -слой	Толщина, мкм	0,1-0,25
	n , среднее значение, см^{-3} (1 — 15) ·	10^{19}
	$\beta\rho$, $\text{см}^2/(\text{В-с})$	~60
	D , среднее значение, $\text{см}^2/\text{с}$	I
	ρ , среднее значение, Ом-см	$10^{-3}—10^{-1}$
	ρ на поверхности, Ом/ см^2	25-300
	τ_h , мкс	$10^{-4}-10^{-1}$
	$S^{*4}, \text{см}/\text{с}$	10^4
Солнечный элемент	Площадь, см^2	4-10
	W_d , мкм	~ 0,4
	V_d , В	-0,94

R_s , Ом-см ²	0,05—0,25
Расстояние между лицевыми токосъемными полосами , мм	5—25
Степень покрытия лицевым токосъемом, %..	5-8

Переход формируется при диффузии атомов Р или As из газообразных диффузантов PH_3 , POCl или AsH_3 , которые содержатся в газе-носителе. Поверхностную концентрацию примеси ограничивают. Для этого добавляют кислород, который образует "диффузионное стекло" на основе SiO_2 , затем стекло удаляют.

В качестве тыльного контакта как правило используют слой Al, который осаждают методом термического испарения в вакууме. Для диффузии части слоя Al проводят термический отжиг (например, при температурах 600 – 800°С в течение 10 - 15 мин). При этом p^+ -слой снижает сопротивление контакта. Для создания толстого p^+ -слоя толщиной более 0,2 мкм требуется отжиг при 730 – 800°С в течение 3 ч. Образующееся электрическое поле, снижает на тыльной поверхности влияние поверхностной рекомбинации.

Наилучшим материалом для лицевой контактной сетки могло бы стать серебро, однако оно имеет недостаточную адгезию к чистой поверхности Si. Для улучшения адгезии используют промежуточный слой Ti или Cr толщиной 30 – 40 нм. Однако при влаге между Ti и Ag происходит электрохимическая реакция, поэтому для предотвращения коррозии между ними часто вводят слой Pd толщиной около 20 нм. Лицевой контакт отжигают при 550 – 600° С в течение 10 – 30 мин. Толщина слоя Ag должна быть достаточно большой (около 7 мкм) для уменьшения сопротивления собираемому току. Лицевой контакт формируют в виде сетки, контактные полосы которой в зависимости от удельного сопротивления и толщины n -слоя разделены зазором от 0,03 до 0,3 см и соединены общим токосъемом. Контактная сетка и общий токосъем занимают от 5 до 8% общей площади элемента. Многослойный Ti – Pd – Ag-контакт наносят и на тыльную поверхность, например при создании туннельного контакта к p^+ -слою, который легирован алюминием.

В используемом спектральном диапазоне (от 0,35 до 1,1 мкм) коэффициент отражения кремния имеет значение 35 – 55%, поэтому на его поверхность необходимо наносить просветляющее покрытие. Оптимальное однослойное покрытие в этом интервале снижает коэффициент отражения примерно до 10, а двухслойное – до 3%. В качестве просветляющих покрытий используют слои SiO, SiO, Si₃N₄, Al₂O, TiO₂ и Ta₂O₅, причем последний из них ввиду его высокого пропускания в УФ-диапазоне особенно эффективен для солнечных элементов с расширенной областью спектральной чувствительности.

Нанесением ПП изготовление СЭ заканчивается, оно также служит для пассивации поверхности и защиты ее под воздействием атмосферы от коррозии. СЭ, дополнительно покрывают стеклом для защиты от радиационного воздействия в космосе, [2].

1.4. Этапы изготовления

Ниже приводится технологический маршрут изготовления солнечного элемента:

- 1) контроль качества кремниевого слитка;
- 2) разделение на пластины;
- 3) очистка и обезжиривание ;
- 4) механическая полировка (вместо этого можно использовать химическую полировку на большую глубину);
- 5) полирующее травление при 110⁰ С в 40%-ном растворе NaOH + H₂O, затем можно использовать травитель для текстурирования поверхности);
- 6) окончательная очистка (путем чередования очистки в растворах HCl - H₂O и HF и промывки);
- 7) проведение диффузии фосфора с двух сторон (из смеси газов PH₃ + Ar + O₂ при 860 °С в течение 15 мин);
- 8) удаление травлением в HF стеклообразного слоя диффузанта;
- 9) осаждение Al толщиной 60 нм на тыльную поверхность испарением в

вакууме;

- 10) проведение диффузии Al при 800°C в течение 15 мин (для создания p^{+} -слоя);
- 11) маскирование с целью создания рисунка токосъемной сетки (с помощью фотолитографии или маски);
- 12) осаждение Ti, Pd и Ag на лицевую и тыльную поверхности;
- 13) удаление маски;
- 14) отжиг контактов примерно при 560°C в течение 10 - 15 мин;
- 15) Гальваническое осаждение Ag;
- 16) осаждение просветляющего покрытия (например, Ta_2O_5) и последующий отжиг при 450°C в течение 1 мин;
- 17) разделение на прямоугольники и обработка торцов (удаление диффузионных закороток на торцах);
- 18) контроль качества.

Эта схема технологического процесса упрощена, в нее не вошли многочисленные этапы контроля параметров и очистки, необходимые при изготовлении элементов. Для изготовления сетчатого токосъема в ряде случаев применяется способ трафаретной печати с помощью пасты из серебра, с последующей термообработкой.

Параметры двух типов кремниевых солнечных элементов приведены в табл. 1.3. Из нее видно, что "фиолетовый" элемент предпочтительнее для повышения J_{sc} . В этом можно убедиться, исходя из рис. 1.3, на котором представлены рассчитанные спектральные зависимости коэффициентов собирания (внутренних) фотогенерированных носителей заряда p - и n -областей и обедненного слоя СЭ с очень малыми потерями на лицевой поверхности. И для сравнения на рис. 1.4 показаны экспериментальные значения коэффициента собирания.

Таблица 1.3 – Электрические параметры кремниевых СЭ

Тип солнечного элемента	$U_{\text{хх}}$, В	$I_{\text{кз}}$, А	FF	КПД, %	I_0 , А/см ²	КПД(AM1), %	$I_{\text{кз}}$ (AM1), А
Фиолетовый	0,595	0,4	0,78	14	10^{-12}	17	-
Текстурированный элемент	0,591	0,46	0,77	15,3	$6 \cdot 10^{-12}$	18	0,34
С полученными на практике предельными теоретическими параметрами	0,69	0,47	0,84	18,5-19	-	-	-
С практически достижимыми предельными теоретическими параметрами	0,79	0,48	0,86	22	$24 \cdot 10^{-16}$	25	-
С теоретически предельными параметрами	0,85	0,54	0,87	29	$2 \cdot 10^{-16}$	-	-

Уменьшение коэффициента собирания при высоких энергиях фотонов обусловлен потерями в *n*-области СЕ из-за высокой скорости рекомбинации на поверхности и в объеме. Благодаря улучшению параметров *n*-области можно увеличить коэффициент собирания до 85% и более при энергии фотонов 3 эВ. Очевидно, что уменьшение J_{sc} может быть связано также с потерями, которые обусловлены отражением света поверхностью элемента.

При построении этой зависимости потери на отражение и затенение не учитывали; для этого элемента $J_{\text{sc}} = 42 \text{ А/см}^2$. Данные предоставлены Solarex Corp., Rockville, Maryland [2].

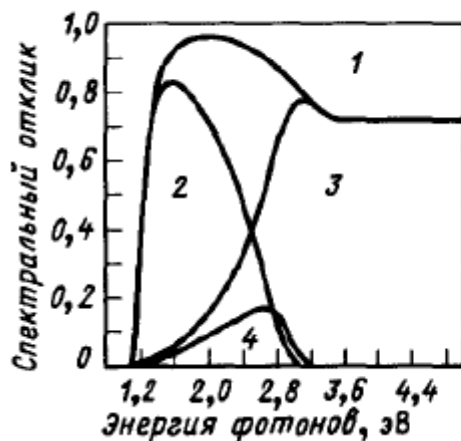


Рисунок 1.3 – Расчетные спектральные зависимости внутренних коэффициентов собирания Si $p-n$ элемента, показывающие вклад каждой из трех областей элемента в полный коэффициент собирания. Скорость поверхностной рекомбинации около 10^4 см/с: 1 - полный коэффициент собирания; 2 - базовый слой; 3 - диффузионный слой; 4 - слой обеднения.

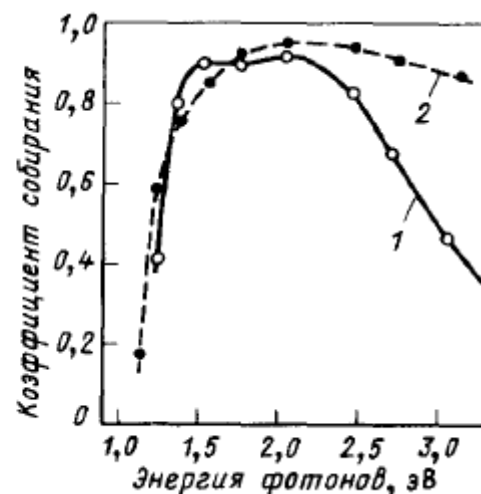


Рисунок 1.4 – Экспериментальные спектральные зависимости коэффициента собирания для типичных кремниевых солнечных элементов с $p-n$ -переходом: 1 - для типичного элемента с КПД = 13,7% при АМ1; 2 - при АМО в случае текстурированного элемента, предназначенного для космического применения.

1.5. Критерии качества изготовления СЭ

Качество внешнего вида батареи отражает и качество ее изготовления в целом. По отдельным показателям качества батареи устанавливают, пригодна она или нет. Показатели качества могут быть функциональными и внешнего вида. Функциональные показатели оказывают влияние (или могут это делать в ходе эксплуатации) на характеристики батареи, срок службы или надежность; показатели внешнего вида этого влияния не оказывают. К какой группе относится тот или иной показатель – зависит от особенностей конструкции батареи, от того, в каких

условиях она будет работать, т. е. от конкретного назначения батареи. Для определения качества изготовления батареи в каждом особом случае можно использовать следующие показатели.

Растрескивание солнечных элементов. Трещину можно отнести к показателям внешнего вида, если она разделила лицевой и тыльный контакты таким образом, что они не оказались электрически разъединенными вследствие дублирования электрических соединений. Все другие трещины в различной степени функциональны. Некоторые трещины не ухудшают электрические характеристики СЭ. Однако во время эксплуатации в результате механических нагрузок и термоциклирования трещины в полупроводниках могут разрастаться и пройти через площадь, занимаемую контактом. В дальнейшем это может привести к изменению характеристик элементов.

Растрескивание покрытий (космических батарей). Трещины, которые проходят вне активной площади элемента, можно отнести к показателям внешнего вида. Все другие трещины функциональны. Радиационную защиту и типовые свойства батареи трещины не ухудшают. Однако если радиационная защита неполная, деградация одного элемента может повлечь за собой деградацию всей цепочки.

Растрескивание покрытий (наземных батарей), обеспечивающих защиту от влаги и механических повреждений, относится к функциональным показателям.

Сколы элементов и покрытий (у космических батарей). У батарей, предназначенных для работы на синхронных орбитах, допустимо небольшое число сколов; для работы на низких орбитах допускается большее их число. Это число зависит от запаса мощности батареи и от вероятности повреждений от протонов. При полетах в радиационных поясах дефекты покрытий не допускаются, за исключением случаев, когда батарея имеет большой запас мощности. Дефект на отдельном элементе может быть причиной деградации всей последовательной цепочки элементов.

Вариации цветовых оттенков. СЭ и покрытия могут иметь различные

цветовые оттенки, особенно если их рассматривать под большим углом от нормали к поверхности. Это явление можно считать показателем внешнего вида.

Отслоение покрытий. Сюда входят частичное отслоение покрытий от СЭ, пузыри и пустоты в слое клея. Небольшое число таких дефектов допустимо и зависит от запаса мощности батареи, жесткости механических нагрузок, агрессивности окружающей среды, диапазона термоциклирования. При температурном воздействии возникают небольшие отслоения, число которых может увеличиться при эксплуатации.

Толщина слоя клеящего состава. Колебания толщины элемента и слоя клеящего состава могут оказаться функциональными показателями в зависимости от прикладываемых термомеханических нагрузок, от отверждающих свойств клея и от стойкости к потере светопропускания в конце срока службы батареи. Небольшое изменение толщины влияет только на внешний вид.

Наплывы клеящего состава. При попадании клеящего состава в зазоры между элементами и шинками изменяется лишь внешний вид модуля или группы, если клей остается достаточно гибким во всем рабочем (или нерабочем) диапазоне температур батареи. При температурах ниже -100°C клей обычно становится твердым и хрупким, вызывает разрывы и трещины в элементах, покрытиях и шинках.

Наплыв клеящего состава на переднюю поверхность покрытия может вызвать затенение элемента из-за воздействия ультрафиолетового излучения на клей. Небольшие наплывы не причиняют вреда; наплывы, занимающие большие площади, могут привести к падению выходной мощности батареи [4].

2. РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

2.1. Механизмы радиационного воздействия

Физические механизмы радиационных воздействий на элементы и материалы оборудования КА зависят от типа облучаемого материала, энергии и вида воздействующего излучения, условий облучения – т.е. интенсивности воздействующего излучения (мощности дозы), температуры материала и целого ряда других факторов. Ионизирующее излучение космического пространства является многокомпонентным по энергии и составу. Его составляющие могут воздействовать на КА в разной временной и в различных сочетаниях последовательности, поэтому возникающие в материалах КА радиационные эффекты имеют очень сложный характер.

Радиационными эффектами называют любые изменения структуры, состояния вещества или материала, свойств, вызываемые действием излучения. Анализировать радиационные эффекты также сложно из-за состава и структуры многих материалов, которые используются в конструкции КА: полимеров, композитов, многослойных тонкопленочных структур и т. д.

Необратимые и обратимые изменения свойств материалов происходят за счет процессов преобразования энергии излучения ионизации в веществе.

Электронно-дырочные пары, которые генерируются в твердом теле из-за торможения заряженных частиц в результате ионизационных потерь энергии, вызывают радиолюминесценцию, радиационную проводимость, радиационное окрашивание и радиационно-химические превращения.

Радиолюминесценция и радиационная проводимость определяются в основном мощностью дозы излучения и сравнительно быстро исчезают после прекращения облучения. Время релаксации составляет $\sim 10^{-9}$ - 10^{-1} с в зависимости от типа материала. Такие явления характеризуют общую картину обратимых радиационных процессов.

Радиационно-химические превращения и радиационное окрашивание

диэлектриков и в основном зависят от суммарной поглощенной дозы излучения. Время релаксации явлений достигает $1 \cdot 10^{-7}$ с и более. Носители заряда, которые образуются в облучаемом веществе, создают нестационарные и стационарные токи приводят к накоплению в диэлектриках объемного заряда, который может в течение длительного времени сохраняться. Последний процесс, может быть причиной появления электрических разрядов в диэлектрических материалах КА.

Эффекты смещения, приводящие к образованию сложных долгоживущих и простых короткоживущих радиационных дефектов кристаллической решетки в твердом теле, оказывают значительное влияние на оптические, электрофизические и механические свойства материалов. Процессы накопления и возникновения радиационных дефектов очень критичны для полупроводниковых материалов и приборов, которые используются в оборудовании КА. Их влияние проявляется в основном за счет изменения концентрации и подвижности носителей, времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводниках.

Важно, что воздействие ионизирующего излучения в космосе на материалы КА происходит на фоне влияния других факторов: горячей и холодной космической плазмы, солнечного электромагнитного излучения, знакопеременной температуры в условиях невесомости; изменения для материалов, которые находятся на поверхности КА, составляет от -160 до $+120^{\circ}\text{C}$ и т. д. Это значительно усложняет характер процессов, протекающих в материалах и элементах оборудования КА.

Для описания РС элементов и материалов оборудования используется ряд определенных терминов:

- ♦ Радиационная стойкость материалов - выполнять определенные функции и поддерживать заданные свойства и параметры в указанных пределах в течение и после технических условий.

воздействие ионизирующего излучения;

- ♦ Радиационный предел радиационной стойкости - доза или плавность ионизирующего излучения, когда изменения важнейших технических свойств материалов не превышают допустимых значений;

- ♦ Радиационная недостаточность - рабочие характеристики материала,

элемента, изделия снизились из-за воздействия ионизирующего излучения.

Усредненные данные о радиационной стойкости некоторых элементов оборудования и материалов, используемых при создании КА, приведены в табл. 2.1.

Из табл. 2.1 видно, что в наибольше подвержены воздействию космической радиации оптические и полупроводниковые материалы, в меньшей степени – терморегулирующие покрытия, полимерные материалы а металлы имеют наиболее высокую стойкость к воздействию радиации.

Использование таких данных позволяет производить предварительный выбор элементов оборудования КА, классифицировать материалы по уровню РС для различных условий эксплуатации. Окончательный выбор материалов осуществляется на основании результатов комплексных натурных и лабораторных испытаний а также сведений о поведении материалов в космосе, получаемых методами математического моделирования [13].

Таблица 2.1 – Радиационная стойкость элементов оборудования и материалов КА

Материал, изделие	Доза, Гр	Изменение характеристик, характер воздействия
Полупроводниковые приборы	$10^3 - 10^4$	Увеличение обратных токов, снижение усиления
Микропроцессоры БИС	$10^2 - 10^3$	Обратимые и необратимые перемещающиеся отказы, радиационные сбои
Солнечные элементы	$10^3 - 10^4$	Снижение КПД
Оптические стекла	$10^3 - 10^4$	Ухудшение прозрачности за счет радиационного окрашивания
Волоконная оптика	$10^2 - 10^3$	Снижение амплитуды передаваемого сигнала за счет радиационного окрашивания
Интегральная оптика	$10^2 - 10^3$	Снижение КПД, радиационная окраска световодов

Полимерные материалы	$10^4 - 10^6$	Деградация оптических, механических и электроизоляционных характеристик
Терморегулирующие покрытия	$10^5 - 10^7$	Увеличение коэффициента поглощения солнечного излучения
Металлы	$10^9 - 10^{10}$	Ухудшение механических свойств

2.2. Воздействие космической радиации на солнечные батареи космических аппаратов

В обеспечении функционирования КА важнейшую роль играют системы энергоснабжения. На всех современных КА для питания бортовых систем электрическая энергия вырабатывается с помощью СБ, которые собираются из большого числа ФЭП, изготовленных из кристаллического кремния. Расширяется применение ФЭП из арсенида галлия (GaAs) и других соединений АЗВ5, которые имеют более высокую эффективность и РС.

Наиболее повреждают ФЭП протоны РПЗ и СКЛ. В результате их воздействия снижаются параметры вольт-амперной характеристики ФЭП: напряжения холостого хода (U_{xx}) и тока короткого замыкания ($I_{кз}$) - и, соответственно, снижается вырабатываемая мощность. Для защиты ФЭП от радиационного воздействия их поверхность закрывают тонкими (100 – 250 мкм) пластинами, из специального стекла. Они поглощают основную часть потока протонов, и пропускает без ослабления поток солнечного света. Такими свойствами обладают специальные стекла с добавками окислов редкоземельных металлов, которые создают ловушки для электронов и дырок, образующихся при облучении, препятствуя тем самым возникновению в стекле центров окраски.

Радиационное воздействие на ФЭП характеризуют коэффициентом повреждения K_τ , который связывает с величиной флюенса воздействующих частиц Φ изменение времени жизни неосновных носителей:

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + K_\tau \cdot \Phi, \quad (2.1)$$

где τ_0 и τ – время жизни носителей до и после облучения.

В экспериментах обычно измеряется диффузионная длина носителей L , аналогичным образом вводится коэффициент повреждения K_L :

$$L^{-2} = L_0^{-2} + K_L \Phi. \quad (2.2)$$

Таблица 2.2. – Относительная эффективность повреждения ФЭП протонами и электронами с разными энергиями

Вид частиц	Энергия, МэВ	Относительная коэффициента K_L величина
Электроны	0,5	0,3
	1,0	1,0
	2,5	5,0
	10,0	9,2
Протоны	1,0	$4,5 \cdot 10^4$
	6,5	$1,0 \cdot 10^4$
	30	$5,0 \cdot 10^3$
	100	$2,3 \cdot 10^3$

В табл. 2.2 приведены относительные значения коэффициента K_L для кремниевого ФЭП p -типа при облучении протонами и электронами с разными энергиями. Величина K_L нормирована на соответствующее значение для электронов с энергией 1 МэВ, которые принято использовать при стандартных испытаниях ФЭП на радиационную стойкость.

На рис. 2.3а показано изменение ВАХ ФЭП, а на рис. 2.3б – относительной величины тока короткого замыкания $I_{кз}$ при облучении протонами с энергией 6,5 МэВ в зависимости от флюенса протонов.

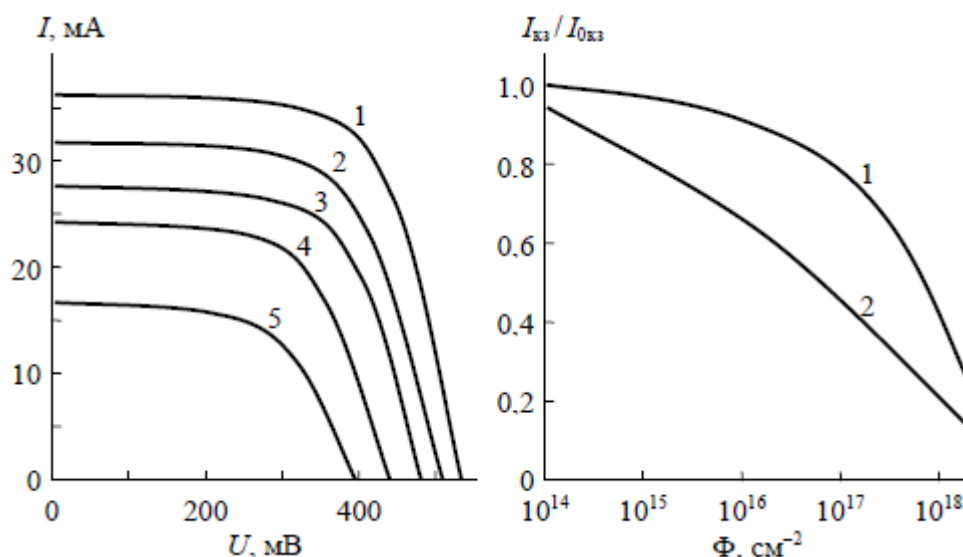


Рисунок 2.3. а – Зависимость ВАХ ФЭП от флюенса протонов [м $^{-2}$] с энергией 6,5 МэВ: 1 - до облучения; 2 - 10^{14} ; 3 - 10^{15} ; 4 - 10^{16} ; 5 - 10^{17} ; б – Зависимость относительной величины тока короткого замыкания I_{K3} от флюенса протонов для ФЭП из GaAs (1) и Si (2)

В кремниевых ФЭП напряжение холостого хода достигает $U_{xx} \sim 0,58 - 0,63$ В при плотности тока короткого замыкания $I_{K3} \sim 42 - 45$ мА·см $^{-2}$. Теоретически в кремниевом ФЭП к.п.д. энергии солнечного излучения в электрическую может достигать 25%, реально КПД серийно выпускаемых ФЭП составляют 17 – 19 %.

Благодаря использованию коэффициента повреждения K_L можно установить эквивалентность воздействия на характеристики ФЭП частиц как одного вида с различной энергией, так и частиц разных видов. В результате это позволяет охарактеризовать влияние на ФЭП облучения через эквивалентный поток моноэнергетических частиц. Как указывалось в этом качестве выбраны электроны с энергией 1 МэВ. На рис. 2.4 показаны зависимости параметров ФЭП от флюенса электронов с такой 1 МэВ.

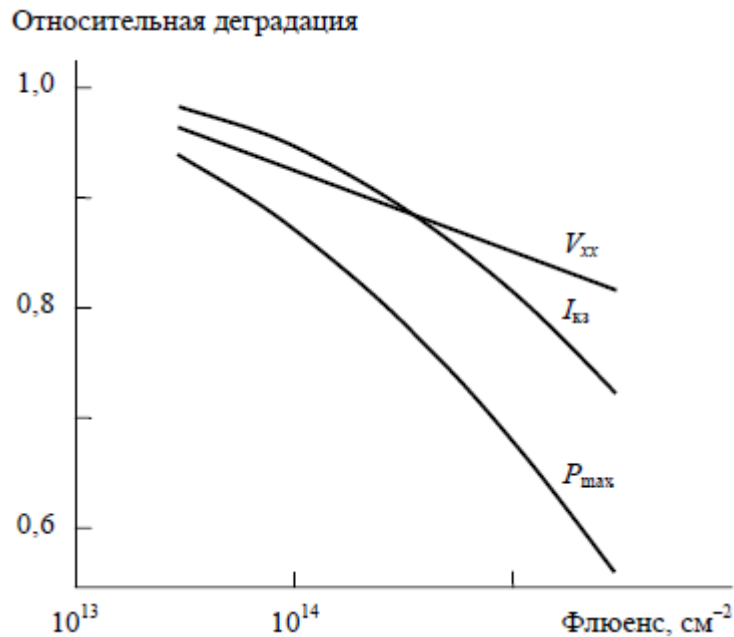


Рисунок 2.4. – Зависимость параметров ФЭП от флюенса электронов с энергией 1 МэВ.

Потеря мощности солнечной батареи, защищенной стеклом, за счет воздействия космической радиации измеряется долями процента в год, однако во время мощных солнечных вспышек, генерирующих протоны СКЛ, могут происходить, как это показано на рис. 2.5, резкие снижения мощности на 1 – 3%.

Основной причиной ухудшения характеристик ФЭП при воздействии космической радиации есть уменьшение времени жизни неосновных носителей (τ). При облучении СЭ в первую очередь будет меняться величина τ в базовой области. Исходная величина этого параметра как правило превышает несколько микросекунд. В легированном слое полупроводника время жизни τ , составляющее $\sim 10^{-9}$ с, уменьшается только при высоких потоках облучения. Снижение τ определяется возрастанием скорости объемной рекомбинации из-за возникновения радиационных дефектов, которые имеют глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне. Такая вероятность рекомбинации неосновных носителей в облученном полупроводнике, которая равная $1 / \tau$, складывается из вероятности рекомбинации через центры, до облучения, и центры, созданные ионизирующим излучением.

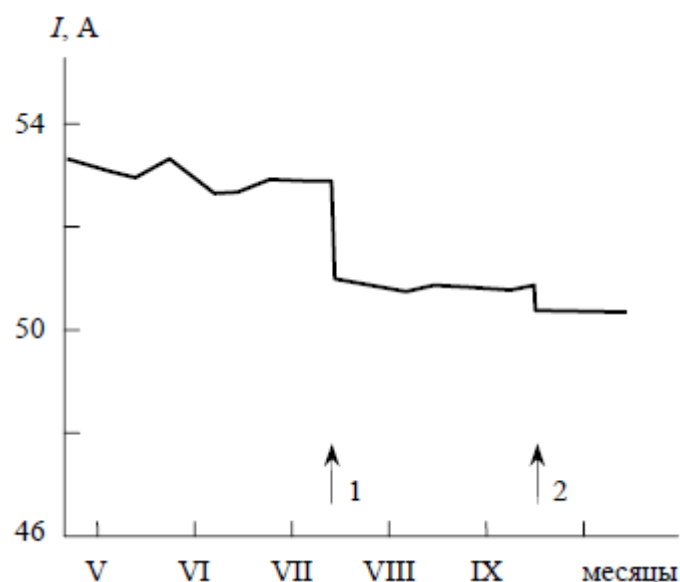


Рисунок 2.5. – График изменения тока солнечных батарей КА при возникновении солнечных вспышек (стрелками указаны моменты вспышек).

Еще одной возможностью повышения РС ФЭП, а именно удаления радиационных повреждений, которые возникают в результате облучения, является высокотемпературный отжиг ФЭП. Отжиг при температуре 400°С в течение нескольких минут приводит к значительному восстановлению параметров поврежденных радиацией ФЭП. Реализация нагрева СБ в космосе до значительных температур потребует преодоления ряда технических трудностей [13].

2.3. Радиационное повреждение СБ

Как уже говорилось, Основной причиной ухудшения свойств солнечных элементов под воздействием космического излучения является сокращение времени жизни несырьевых носителей, τ . Когда FEP облучается, значение τ в базовых областях. Начальное значение этого параметра обычно превышает несколько микросекунд. В легированном слое время жизни s-волокна падает только на сильное излучение. Уменьшение T связано с увеличением скорости коллективной рекомбинации из-за введения радиационных ошибок с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне.

Вероятность рекомбинации несырьевых носителей, равная $1 / \tau$, в облученном полупроводнике представляет собой возможность рекомбинации вдоль центров, существующих до облучения 1 , и центров, образованных ионизирующим излучением. Замечено, что рекомбинация при постоянном уровне инжекции носителей происходит независимо от обоих каналов. Тогда в случае воздействия ионизирующего излучения соотношение $1 / \tau = 1 / \tau_0 +$

$K'F$, где τ - срок службы носителя до и после облучения Fluence F ; K' - коэффициент повреждения, характеризующий эффективность проникновения дефектов и возможность рекомбинации на них одного потока частиц.

В экспериментах по облучению FEP наиболее часто измеряется диффузионная длина; поэтому целесообразно переписать выражение, данное как $\tau = L^2 / D$, где D - коэффициент диффузии носителей. $1 / L = 1 / L_0 + K\Phi$.

Константа $K = K'/D$ также именуется коэффициентом повреждения, который зависит от таких факторов, как вид и энергия облучения, свойства материала.

В общем случае $K = K_{TD} + K_{or}$, где K_{TD} и K_{or} - K_{or} - коэффициенты повреждения полупроводника, которые называются псевдорежимающими зонами от точечных радиационных дефектов и более сложных дефектов, соответственно.

Исследования показали, что длина диффузии неосновных носителей в кремнии n -типа изменяется при облучении быстрее, чем в кремнии p -типа. Следовательно, ФЭП, изготовленные на основе p -кремния (n - p -типа), обладают более высокой РС, чем ФЭП с базой из n -кремния (p - n -типа). По этой причине в настоящее время все СБ космического назначения собираются из ФЭП, выполненных из кремния p -типа проводимости.

Энергия электронов, ответственная за основное повреждение n - p -перехода от кремния, находится в диапазоне 0,5-4 МэВ. Электронный компонент радиационных полос должен фокусироваться на этом диапазоне энергий на кремниевых переходах n - p , имитируя эффект излучения. Из аналогичных данных для протонов следует, что энергетический диапазон, ответственный за максимальное разрушение p - n -переходов, находится в диапазоне 1 - 30 МэВ.

На рис.2.6. приведено относительное повреждение кремниевых ФЭП с учетом космического спектра протонов и экранировки плавленым кварцем.

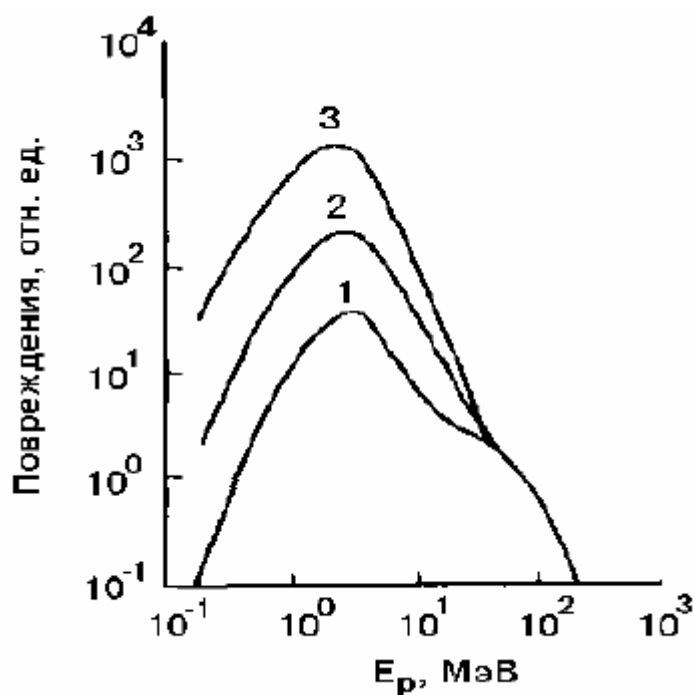


Рисунок 2.6. - Космическое относительное повреждение кремниевых солнечных элементов

Спектр космического протонного и кварцевого экрана: 1 - 1,44 мм; 2 - 0,72 мм; 3 - 0,36 мм [5]. При изучении влияния корпускулярного излучения сложного состава и спектра в лаборатории иногда полезно определить сравнительную оценку повреждения элементов спутника от различных видов излучения. Tab. 2.3 Эффективность радиационного повреждения кремниевой РЭФ-типа

$\rho = 1$ Ом различного см, относительно различного корпускулярного излучения.

Еще один важный вопрос, который необходимо учитывать при имитации

Воздействие космического излучения на пересечения pn больше, чем плотность потока заряженных частиц по сравнению с плотностью потока в пространстве в ускорителях. Основой для сравнения данных, связанных с работой солнечных элементов в условиях воздействия естественного излучения поля, и расчетных данных являются эксперименты по облучению солнечных элементов в лабораторных условиях. Существует хорошее согласие между расчетом

и экспериментом. Это говорит о том, что облучение с плотностью частиц, в несколько раз превышающей естественное сознание, не влияет на последствия коллективной интеграции.

Таблица 2.3. – Эффективность радиационных повреждений кремниевого ФЭП *p*-типа с $\rho = 1$ Ом·см различными видами корпускулярных излучений

Вид частицы	Энергия Е. МэВ	Коэффициент повреждения, К	Относительная эффективность повреждения, K/K_1 *
Электроны	0,5	$6,4 \cdot 10^{-11}$	0,3
	1,0	$2,0 \cdot 10^{-10}$	1
	2,5	10^{-9}	5
	7,0	$1,6 \cdot 6,4 \cdot 10^{-9}$	8
	18,0	$2,5 \cdot 10^{-11}$	12,5
Протоны	0,4	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^5$
	1,0	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^4$
	2,0	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^4$
	6,3	$2,0 \cdot 10^{-6}$	10^4
	19,6	10^{-6}	$5,0 \cdot 10^3$
	30	10^{-6}	$5,0 \cdot 10^3$
	65	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^3$
	100	$4,6 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^3$
	200	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^3$
Альфа-частицы	25,4	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^4$

* K_1 - коэффициент повреждения кремния электронами с энергией 1 МэВ.

Эксперименты по длительному отжигу радиационных дефектов в солнечных элементах, облученных в ускорителях при температуре -100°C , свидетельствуют о незначительном восстановлении свойств (5% прочности) фотоэлектрических элементов. Поэтому оценка поведения в области полупроводниковых приборов при измерениях в лабораторных условиях без отжига может привести только к незначительной ошибке. При воздействии на фотоэлектрическое протонное излучение с энергией 19,6 МэВ, которое может вызывать дефекты в базовой области, наблюдается изменение фотоэлектрического напряжения в общей чувствительности спектра тока.

Во-первых, однако, чувствительность в длинноволновой области, за которую отвечает основание РЕС, уменьшается. На рис. 2,7. Дано спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевой ФЭР, облученной протонами.

энергия $E = 19,6$ МэВ.

На рисунке 2.8 показано спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевых ФЭП, облученных протонами с энергией $E = 0,2$ МэВ.

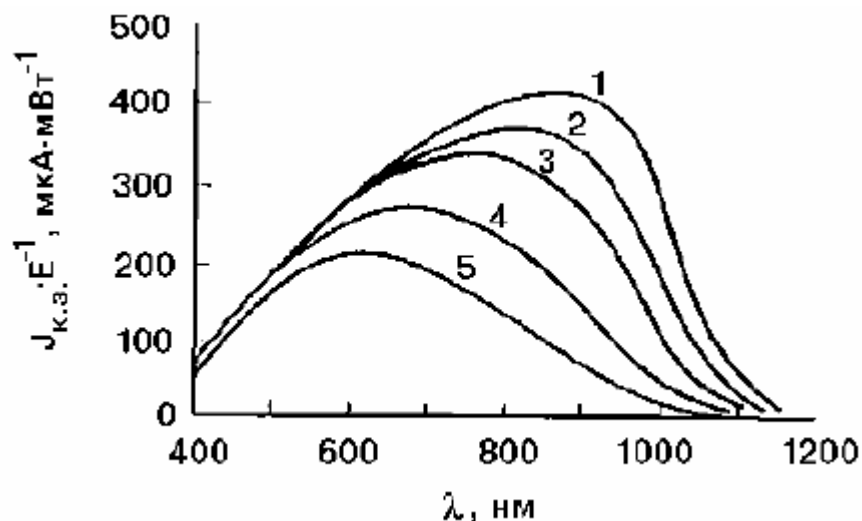


Рисунок 2.7. – Спектральное распределение тока короткого замыкания кремниевых ФЭП, облученных протонами с энергией $E=19,6$ МэВ: 1 – до облучения; 2 - после облучения флюенсом Φ [протон·м²] : 10^{14} ; 3 - 10^{15} ; 4 - 10^{16} ; 5 - 10^{17} [5].

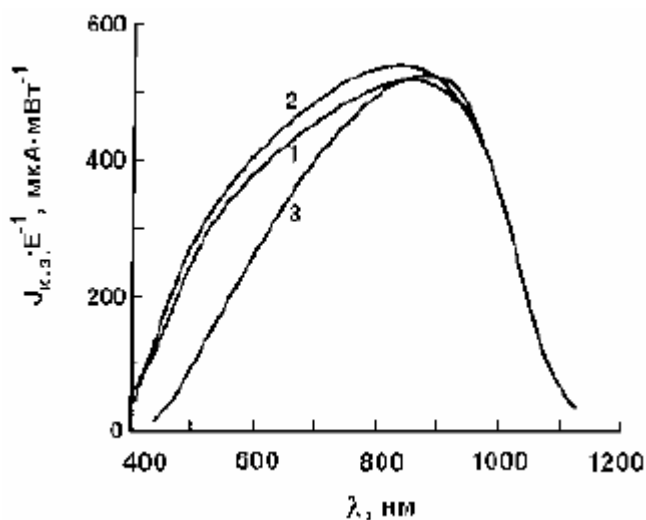


Рисунок 2.8. $E = 0,2$ МэВ: спектральное распределение тока короткого замыкания кремний-ионного ФЭП, облученного протонами под напряжением; F [proton m⁻²]: 2- 10^{15} после облучения беглостью; 3 - 10^{17} [5].

Чувствительность к коротковолновому свету определяется тонким (1–2 сплавом) поверхностным слоем сплава, который практически не изменяется при слабом добавленном излучении, поскольку скорость рекомбинации в этом слое уже высока до облучения из-за высокой концентрации погрешностей.

Изменения вольт-амперных характеристик кремниевой FEP различны при облучении протонами с энергией 6,3 МэВ и 0,2 МэВ (рис. 2.9).

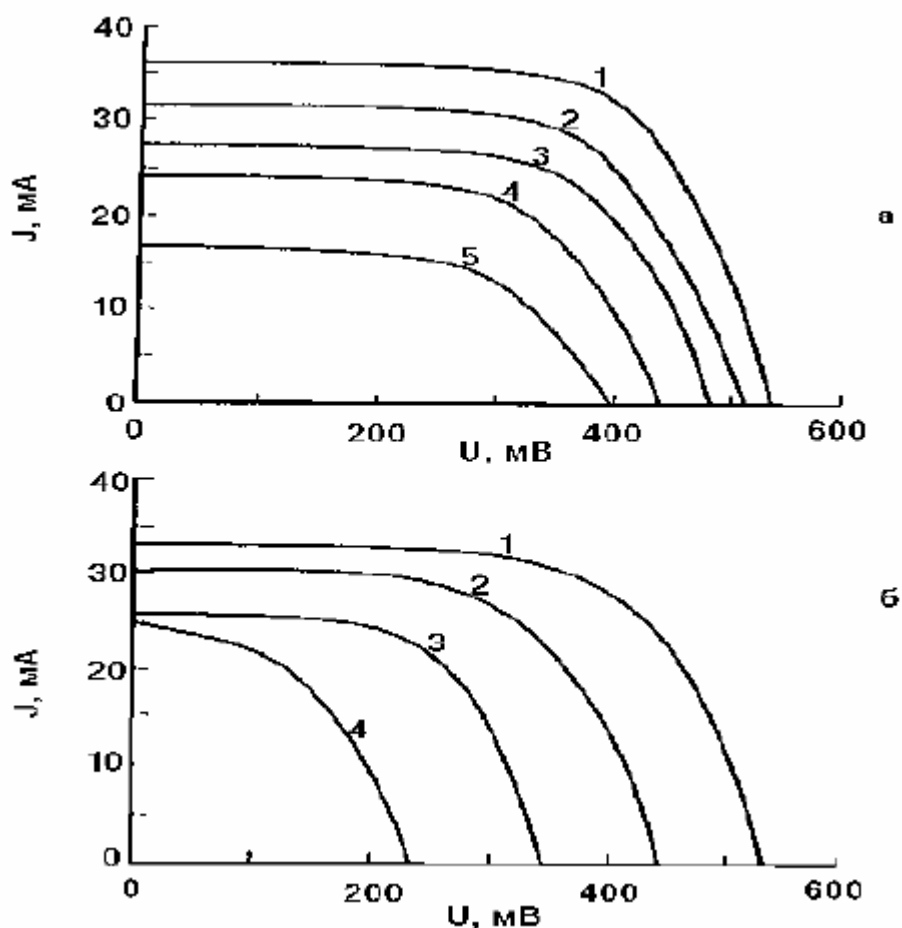


Рисунок 2.9. – Рисунок 2.9. - нагрузочные вольт-амперные характеристики кремния ФЕП [МэВ] (источник освещения - солнечный имитатор атмосферного света), облучаемый протонами разных энергий: а-6,3; б - 0,2: 1 - максимальная экспозиция; После облучения флюенсом Φ [протон·м⁻²]: 2 - 10^{14} ; 3- 10^{15} ; 4- 10^{16} ; 5- 10^{17} [5].

2.4. Методы радиационных испытаний материалов космической техники

Космический аппарат содержит много различных типов элементов, которые значительно отличаются по своей радиационной надежности. Хотя к настоящему времени накоплен значительный опыт поведения материалов и отдельных узлов космических аппаратов в условиях космического полета, продолжающееся усложнение программ полета и обновление базовой базы космического оборудования требуют дальнейшей разработки таких методов, как прогнозирование излучения, надежность космических аппаратов, технологии и увеличение.

Когда радиационная надежность космического корабля исследуется, широко используется метод моделирования, состоящий в замене всего спектра космического излучения одним или двумя типами излучения, поскольку весь набор внешних повреждающих факторов не может быть воспроизведен в наземных условиях и сокращает время испытаний.

Разнообразие радиационных процессов, происходящих в материалах под воздействием радиации, не позволяет создать единый метод моделирования для всех ситуаций. Выбор метода проверки радиационной безопасности производится с учетом индивидуальных особенностей исследуемых объектов.

В таблице 2.4 приведены основные характеристики космического корпускулярного излучения.

Оценка материалов и элементов РС на внешней поверхности космического корабля еще более осложняется тем фактом, что на эти материалы вместе с ионизирующим излучением влияют другие факторы внешней среды, которые могут вызывать различные фотохимические и плазмохимические явления.

Некоторые диэлектрические классы заполненных радиационных частиц, вызванные радиационными поясами Земли, могут вызвать накопление этих зарядов в массе и на поверхности таких материалов. Некомпенсированные электрические заряды в диэлектриках - электрический распад и механическое разрушение таких элементов, как оптические стекла на внешней поверхности космического корабля,

различаются по своим оптическим и другим свойствам, которые вызывают структурные и фазовые изменения вследствие физико-химических процессов, вызванных излучением.

Таблица 2.4. - Параметры галактических и солнечных космических лучей, радиационных поясов Земли и горячей магнитосферной плазмы.

Тип корпускулярных космических излучений	Состав	Энергия частиц, МэВ	Плотность потока, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Галактические космические лучи	Протоны (p) Ядра He (α) Тяжелые ядра	$10^2 - 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^4$ 10^3 $1,2 \cdot 10$
Солнечные космические лучи	Протоны (p)	$1 - 10^4$	$10^7 - 10^8$
Радиационные пояса Земли	Протоны (p) Электроны (e)	1-30 >30 0,1-1,0 >1,0	$3 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^8$ $1 \cdot 10^{12}$ $1 \cdot 10^{10}$
Горячая магнитосферная плазма	Протоны (p) Электроны (e)	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^{11} - 10^{14}$

Методы радиационных испытаний.

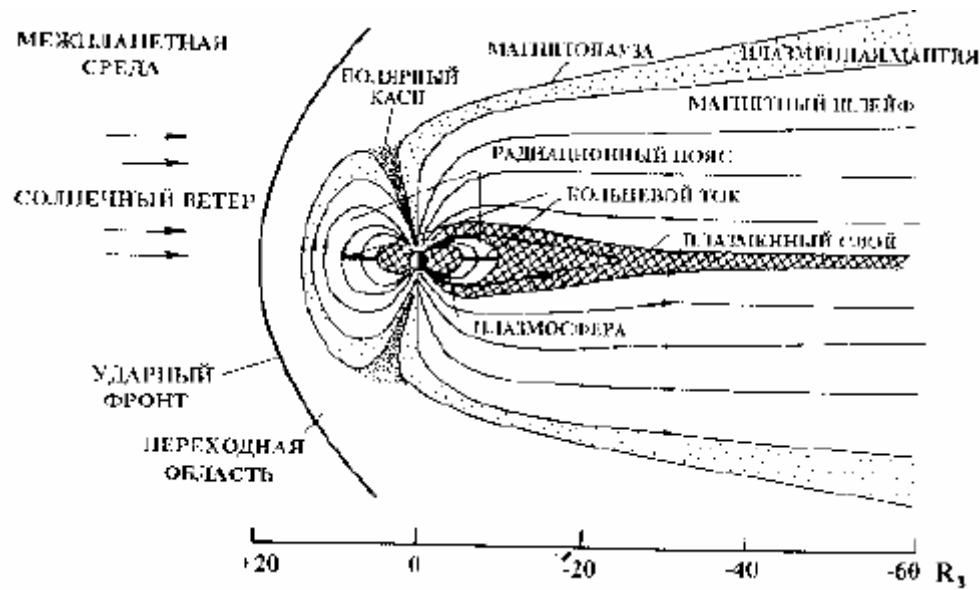
Для бортового оборудования космических объектов с тонкостенной защитой наибольшую опасность в спектре космического корпускулярного излучения представляют протоны и альфа-частицы с энергией от 1 до 30 МэВ, а также электроны с энергией от 0,5 до 7 МэВ.

На рис. 2.18 представляет общую картину структуры магнитосферы Земли и потока солнечного ветра.

Ионы высоких энергий не могут вызывать значительных изменений дозы в материалах из-за низкой плотности потока космического излучения, но их следует рассматривать как источник фоновое излучения и источник помех при передаче.

и измерительные приборы. В частности, конкретную опасность представляют собой высокоэнергетические ядра тяжелых элементов, которые образуют галактические космические лучи. Хотя их плотность чрезвычайно мала, каждая из этих частиц может привести к очень сильной локальной ионизации и воздействовать

на материалы интегрированных электронных узлов и, например, на элементы памяти резидентных компьютеров, вызывая единичный радиационный



сбой.

Рисунок 2.18. - Общая картина структуры магнитосферы Земли и ее обтекания солнечным ветром (меридиональный разрез)

Для проведения имитационных радиационных испытаний материалов, используемых в КА, применяется ряд подходов.

Разделение имитационных испытаний на последовательные стадии весьма условно и в отдельных случаях может дополняться и иными подходами [5].

3. ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

3.1. Типы покрытий и их назначение

Тонкие металлы из различных материалов (металлы, диэлектрики, полупроводники, органические и кремнийорганические полимеры и т. Д.) Наносят на разрушающие и отражающие поверхности деталей. Изменяют оптические, химические и электрические свойства деталей с их помощью. По предварительной договоренности покрытия делятся на несколько видов.

Светоотражающие (зеркальные) покрытия отражают световой поток на нем; Характерно коэффициент отражения ρ . Покрытия для разделения луча (полупрозрачные) делят световой поток, падающий на поверхность отраженным и проходящим образом; Он характеризуется коэффициентами отражения и пропускания ρ / τ и отношением коэффициента поглощения света к части.

Осветляющие покрытия увеличивают поток проходящего света, уменьшая отражение на границе раздела сред с различными показателями преломления; коэффициент остаточного отражения ρ .

Фильтрующие интерференционные и нейтральные покрытия различной интенсивности предназначены для выделения определенной области спектра из падающего светового потока или для равномерного ослабления по всему спектру. Эти покрытия характеризуются пропусканием или отражением на заданной длине волны, шириной спектрального диапазона при максимальном пропускании.

Защитные покрытия повышают химическую стойкость поверхностей деталей и других типов покрытий и увеличивают поверхностную прочность. Проводящие покрытия защищают детали от замерзания и запотевания и удаляют накопленные электростатические заряды.

Поляризационные покрытия обеспечивают линейный поляризованный свет в узкой области спектра; Характеризуется степенью поляризации проходящего и

отраженного светового потока в определенной части спектра. Свойства, которые характеризуют покрытие, включают химическую и коррозионную стойкость, механическую и термическую стойкость, а также оптику.

Каждый тип покрытия, материал пленки, способ нанесения, защита и так далее. Есть несколько вариантов, которые отличаются. В зависимости от этого фильма, он имеет разные свойства. Тип и тип покрытия могут различаться в зависимости от материала детали, применяемых требований, условий эксплуатации и т. Д. Выбирается в зависимости.

Методы нанесения покрытия химически и физически разделены. Химические вещества основаны на реакциях, которые происходят с пленкообразующими веществами на поверхности детали или когда она взаимодействует с последней. К ним относятся травление (Т), осаждение из растворов пленкообразующих материалов (Р), обработка (D) в паре и газах, электролиз (Е), нанесение расплава (Н), нанесение кистью или распылением (Р). Физические методы основаны на испарении и конденсации веществ в вакууме, включая испарение (I), катодное распыление (К), испарение с использованием электронного нагрева (IE) [6].

3.2. Просветляющие покрытия в оптике

Оптические покрытия могут повысить электрофизические и эксплуатационные свойства солнечных преобразователей, основанные на различных физических принципах, включая полупроводниковые солнечные элементы, продлить срок службы и повысить эффективность. В зависимости от области применения солнечных элементов работа, которая решается с помощью оптических покрытий, варьируется.

Когда солнечные элементы используются главным образом по их качеству - для преобразования солнечной энергии непосредственно в электрическую энергию, оптические покрытия уменьшают отражение в зоне спектральной чувствительности из-за влияния помех (обесцвечивание поверхности).

Когда солнечные элементы размещаются вне тепловых коллекторов в фототермических установках, которые одновременно генерируют электрическую и тепловую энергию, оптические покрытия должны придавать поверхности

солнечных элементов селективные свойства, противоположные нормальным: зона отражения в солнечном излучении уменьшается (и высокая прозрачность в этой части спектра) это приводит к увеличению интегрального коэффициента поглощения солнечного света (α), что увеличивает коэффициент отражения в широком спектре инфракрасного излучения для уменьшения термодиффузии. , В этом случае, наряду с генерацией электричества, солнечный элемент одновременно играет роль селективных оптических поверхностей тепловых коллекторов солнечного излучения.

Селективные черно-белые покрытия следует наносить на поверхность тепловых коллекторов, не содержащих солнечных элементов, с высокими коэффициентами α / ϵ и поглощающими в зоне солнечного излучения (необходимость прозрачности покрытий в спектре). зона солнечной радиации, обязательная для солнечных элементов, этот случай исключен).

Разумеется, оптимальные оптические свойства покрытий должны сочетаться со светостойкостью, которая может сохранять исходные свойства неизменными в течение всего активного присутствия солнечных преобразователей. Чтобы оценить эти качества, необходимы полномасштабные испытания почвы и полевых экспериментальных образцов новых покрытий и преобразователей с покрытиями, а также тщательная лаборатория.

Освещение поверхностей элементов оптической системы используется по двум причинам. Во-первых, уменьшить потери интенсивности излучения при отражении, т.е. увеличить пропускную способность оптического элемента. Это особенно верно при разработке различных фотоприемников, таких как СЦ. Во-вторых, если свет, подвергающийся множественным отражениям от поверхностей элементов (так называемый «яркий свет»), попадает на плоскость изображения, это приводит к снижению контрастности и резкости изображения. Создание антибликовых покрытий благодаря их освещенности особенно важно при разработке устройств отображения информации: вакуумных мониторов, кинескопов и оптических систем ввода для фото- и видеоаппаратуры.

Пленочные материалы для антибликовых покрытий

В зависимости от конструкции ПП и диапазона длин волн освещения выбираются покрытия из различных материалов. Поскольку эти покрытия формируются методами распыления, важно, чтобы качество оптических пленочных материалов соответствовало многим важным критериям:

- 1) Прозрачность;
- 2) оптимальный показатель преломления;
- 3) Оптическая однородность;
- 4) относительная плотность;
- 5) Высокая адгезия и твердость, низкие механические нагрузки;
- 6) подходящие химические свойства (растворимость, реакционная способность);
- 7) Стабильность поведения в транзакционной среде.

Кратко рассмотрим некоторые требования к пленочным материалам.

Прозрачность. Потеря света в пленках должна быть минимальной, что особенно важно при создании многослойных антибликовых покрытий из разных материалов.

Обычно предполагается, что общие потери в многослойных системах представляют собой сумму потерь, возникающих в результате рассеяния и фактического поглощения. Какой из этих факторов является преобладающим, во многом зависит от конкретной ситуации. Потери рассеяния технологически снижаются при получении максимально оптически однородных пленок, которые не содержат пор, трещин, пузырей и других дефектов на поверхности и в объеме.

Потери, вызванные фактическим фактическим поглощением данного материала, могут быть уменьшены только путем выбора типа материала в направлении длины волны. Принимая во внимание дисперсию коэффициента поглощения для выбранного материала, область дисперсии используется намного ниже края поглощения материала под $\lambda_{\text{раб}}$.

Чтобы сделать незначительные потери в многослойных ПП незначительными, потери в пленках толщиной 100 нм должны составлять менее 0,01%. Это

соответствует $k \approx 0,44 \cdot$ или $\approx 10 \text{ см}^{-1}$.

Диэлектрический и полупроводниковый показатель преломления

Фильмы зависят от нескольких факторов:

- о природе материала или, точнее, о типе химической связи в материале. Как правило, показатель преломления увеличивается с увеличением атомного веса элемента: например, углерод $n = 2,38$, Si $n = 3,4$, Ge $n = 4,0$ ($\lambda = 4 \text{ мкм}$). Для соединений с преимущественно ионными связями показатель преломления ниже, чем для соединений с доминирующей ковалентной связью. То есть для Pb $n = 1,76$, для PbO $n = 2,6$, для PbTe $n = 3,9$:

кристаллическая структура. Пленки Ti характеризуются тем, что они сильно зависят от температуры подложки T_s , которая определяет структуру пленок. Таким образом, в диапазоне от 20 до 400 °C пленки могут иметь аморфную или анатазную или рутильную структуру или могут представлять собой смесь аморфной и кристаллической фаз. Однако при $\lambda = 550 \text{ нм}$ $\Delta T_{sn} = 1,9 \dots 2,6$;

- изменение размера зерна, плотности, концентрации поглощенного водяного пара и состава пленки.

Относительная плотность, то есть отношение плотности пленки ρ_f к плотности массивного образца ρ_m . Относительная плотность и показатель преломления связаны соотношением:

$$\rho = \frac{\rho_f}{\rho_m} = \frac{n_f^2 - 1}{n_m^2 + 2} \cdot \frac{n_m^2 + 2}{n_m^2 - 1},$$

где n_f и n_m показатели преломления для пленки и массивного образца, соответственно.

Показатель преломления для пленки и образца партии соответственно.

Снижение содержания лабила может быть связано со структурными дефектами, вызванными включением молекул газа в пленку, повторным испарением добавленных молекул и наличием микропор. Увеличение T_s обычно приводит к увеличению ρ .

Многослойная интерференция Требования, предъявляемые к пленочным

материалам РР, соответствуют диэлектрическим и полупроводниковым материалам. Среди диэлектриков наиболее часто применяются оксиды, фториды, некоторые хлориды, сульфиды и селениты. Полупроводники включают кремний, германий и теллур.

3.3. Требования к прозрачным защитным покрытиям

Покрытия модулей наземных солнечных батарей подвергаются воздействию различных факторов. В настоящее время в целом еще не вполне ясно, как эти факторы воздействуют на материалы покрытий; нельзя также с определенностью сказать, какими должны быть свойства материалов для обеспечения достаточной защиты элементов. Характеристики материалов, представляющих интерес, рассмотрены ниже.

Износостойкость материалов, используемых для покрытий, к атмосферным воздействиям. Эта характеристика, являющаяся одной из основных, показывает относительную сопротивляемость различных материалов воздействию внешней среды. После испытаний в атмосфере часто происходят такие явления, как обесцвечивание, потеря глянца, появление поверхностных царапин, покрытие известковым налетом, разъедание поверхности, появление ржавчины, растрескивание, охрупчивание, потеря прочности и гибкости. В некоторых случаях покрытия превращаются в зернообразные или порошкообразные материалы и выкрашиваются. Атмосферный кислород, влага, свет (особенно ультрафиолетовое излучение Солнца) ускоряют процесс разрушения. Повышенные концентрации озона и промышленных газов обычно способствуют ухудшению первоначальных свойств материалов покрытий.

Оптическое пропускание. Эта характеристика заключается в достаточной широкополосности оптического пропускания покрытий, которые должны быть прозрачны во всей области спектральной чувствительности солнечных элементов и определяются эффектами изменения цвета (потемнения) материалов покрытий и механическими повреждениями их поверхности.

Показатель преломления. Этот оптический параметр материалов покрытий определяет потери света, проходящего к солнечным элементам, вызванные отражением от поверхности.

Влагопроницаемость отражает скорость проникновения паров внутрь корпуса модуля. Все пластики и некоторые стекла являются до определенной степени проницаемыми для влаги. Влага, проникающая в солнечные элементы и межэлементные соединения, может вызывать коррозию и привести к уменьшению выходной мощности модуля

Стойкость к плеснеобразованию показывает способность материалов задерживать рост плесневых грибов или препятствовать ему. Обычно пластификаторы, смазка, стабилизирующие вещества и другие добавки создают питательную среду для роста плесени. Появление плесени на покрытиях приводит к разъеданию их поверхности и к снижению светопропускания.

Оседание пыли и грязи служит характеристикой способности материалов притягивать и удерживать пылинки и грязь из окружающего воздуха.

Эластичность. Знание этого свойства необходимо для расчетов конструкционных напряжений в модулях. Оно включает гибкость модуля, предел текучести, относительное удлинение.

Коэффициент линейного теплового расширения. Эта характеристика имеет важное значение для конструирования некоторых модулей потому, что ею обуславливаются относительное движение слоев собранного модуля и различие в износостойкости.

Сопротивляемость ударным напряжениям. С ее помощью измеряют энергию упругой деформации, которую тело может накопить, прежде чем оно разрушится. Ударные напряжения могут возникать при перевозках, установке и чрезмерных нагрузках. Некоторые пластики выдерживают большие нагрузки. Ряд стекол может в результате обработки приобретать большую прочность к удару по сравнению с обычными стеклами.

Сопротивление истиранию показывает относительную сопротивляемость поверхности покрытий повреждениям, наносимым твердыми частицами,

например песком во время песчаных бурь. Царапины (если их немного) снижают светопропускание покрытий, однако влияют на прозрачность защитных материалов. Покрытия из пластиков можно защитить с помощью твердых и износостойких слоев, обладающих высокой сопротивляемостью к механическим повреждениям.

Сопротивление изоляции не является очень существенной характеристикой покрытий в низковольтных системах, но становится значительной для высоковольтных систем. Напряжение между солнечными элементами и металлической панелью или рамкой защитной стеклянной пластины может вызвать электрохимическую коррозию, а также утечку генерируемой батареей электрической энергии на Землю. Кроме того, при избыточном значении сопротивления может оказаться необходимым обеспечить стекание зарядов статического электричества с поверхности защитных стекол и тем самым частично уменьшить загрязнение стекол притягиваемыми из воздуха пылью и грязью.

Воспламеняемость отражает способность материалов противостоять возгоранию при повышенных температурах, выдерживать действие огня или уменьшать скорость сгорания материалов. Воспламеняемость обычно связывают с формой и размерами материала. Почти все пластические материалы классифицируются как легко воспламеняемые.

Теплопроводность отражает способность материала к эффективному переносу теплоты [4].

4. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

4.1. Методы изготовления оптических покрытий

Тонкие покрытия позволяют изменять оптические, механические свойства, химические, электрические и другие свойства оптических компонентов. АТІ В настоящее время более 98% оптических деталей, Функциональность оптически отделяемого Проводящий и защитный. Основные типы покрытий оптика, доля оптических деталей в общем объеме покрытия Это более 90% [7].

Технология нанесения покрытий сочетает в себе различные процессы Связанный с подготовкой оптических деталей к покрытию, формирование (нанесение) покрытий, контроль свойств. При выборе при реализации этих процедур используются различные методы и оборудование. Оптические и эксплуатационные требования определяются свойства покрытия.

Пленочное покрытие оптических деталей химические, электрохимические, физические методы. К могут быть связаны с химическими, оригинальными процессами формирования пленки. Это вещество претерпевает изменения в своем первоначальном составе при взаимодействии. Другие компоненты или нагретая подложка. Электрохимические процессы несмотря на то, что это тот же персонаж, фильм происходит в результате прохождения.

Электрический ток вдоль электролита, накопленный на деталях субстрат. Эти методы покрыты металлическими пленками поэтому они не были включены в наш обзор. Физический метод приписывается вакуумное испарение в вакууме и распыление катода при разряде низкого давления.

Одним из самых старых методов формирования неотражающей поверхностной пленки с низким показателем преломления является обработка силикатного стекла 50% -ным раствором уксусной кислоты. Сегодня эта технология используется только для заточки мелких деталей сложной конфигурации с высоким показателем преломления. В других случаях метод заменяет его другими способами.

Один эффективный способ получения антибликового покрытия, расщепления луча и других покрытий состоит в нанесении тонкой пленки инородного вещества на поверхность детали, полученной из растворов легко гидролизующихся соединений, таких как следующие. $(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, $\text{TiCl}_2(\text{OC}_2\text{H}_5)_2$, $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, ZrOCl_2 , HfOCl_2 . В результате гидролиза образуются пленки соответствующих оксидов: SiO_2 , TiO_2 , ThO_2 , ZrO_2 , HfO_2 . Эти оксиды прозрачны от ультрафиолетовой области спектра (10-12) мкм.

Вакуумные методы нанесения покрытия становятся сегодня широко распространенными. Вакуум включает термическое испарение в высоком вакууме (10^{-3} Па и менее) и методы физической конденсации пленкообразующих материалов с использованием катодного распыления в низком вакууме (10^{-1} Па).

Начало 60-х Началась интенсивная разработка другого типа антиотражающего покрытия и точно - трехслойное покрытие. Несмотря на то, что такие покрытия являются теорией.

Получение техники, известной в 40-х годах пленки с желаемым показателем преломления. Преимущества трех слоев покрытия, несомненно, но из-за производства медленно развиваются несколько причин. Прежде всего, изготовление таких покрытий Это гораздо более сложная задача, чем создание одного слоя. Оптический Толщина и показатель преломления всех трех слоев должны быть проверены очень высокая точность Основные преимущества вакуумных методов нанесения покрытий контролировать основные технологические параметры в пределах Процесс распыления, хорошая повторяемость и высокая производительность.

Широкое распространение для производства интерференционных покрытий потребовался метод термического испарения в высоком вакууме. Катодные или ионно-плазменные методы получения покрытий распыление мишени при бомбардировке ионами инертного или химически активного газа. Источником ионов является независимый ток в редком газе (излучение). DC или высокая частота) или автономный (дуга или высвобождение электронов).

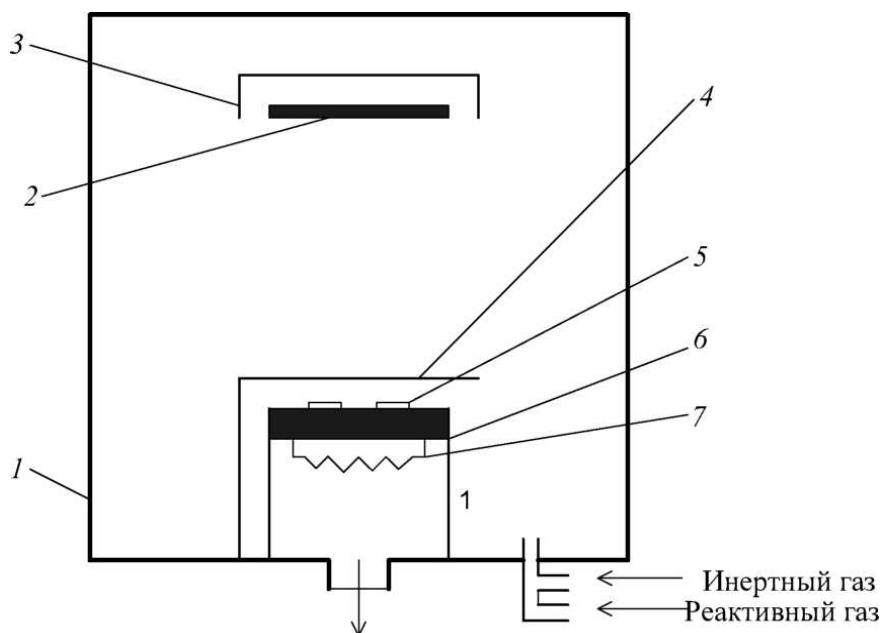


Рисунок 4.1. – Схема установки для нанесения покрытий катодным распылением:

1 - камера; 2 - катод; 3 - заземленный экран; 4 - заслонка; 5 - подложка;
6 - заземленный анод; 7 - резистивный нагреватель подложки

Способ заключается в следующем. Вакуумный объем, содержащий анод и катод, перекачивают до давления 10^{-4} Па, затем вводят инертный газ (Ar при давлении (1-10) Па). Высокое напряжение (1-10) кВ применяется для зажигания бликового разряда между катодом и анодом.

Положительные ионы инертного газа, источником которых является плазма тлеющего разряда, ускоряются в электрическом поле и бомбардируют катод, вызывая распыление. Распыленные атомы падают на подложку и осаждаются в виде тонкой пленки.

Механизм катодного распыления довольно сложный и неопределенный. По существу, процесс распыления заключается в том, что присутствующие ионы газа передают свою энергию атомам и сталкиваются с катодом при столкновении с катодом(мишенью).Выходящие атомы катода могут реагировать с остатками активного газа (если в качестве последнего используются инертные газы, такие как кислород или азот). Когда анод поражен, они погружаются в него и остаются на

нем.

Основные рабочие характеристики MLS включают напряжение и ток разряда, плотность мощности на катоде, рабочее давление газа и магнитную индукцию. Аргон обычно используется в качестве рабочего газа в ПДК. Давление рабочего газа поддерживается в диапазоне -1,0 Па, напряжение разряда 300-800 В. Значения магнитной индукции у поверхности катода составляют (0,03-0,1) Т. Плотность тока на мишень находится на уровне нескольких тысяч ампер на м², а плотность поверхностной энергии - 10⁶ Вт / м².

Системы магнетронного распыления постоянного тока могут работать только с мишенями из проводящих материалов. Если используются высокочастотные источники питания, мишени из непроводящих материалов (ВЧ-магнетроны) также можно распылять.

Схема магнетронного распыления показана на рисунке 4.2. При высокочастотном распылении скорость роста слоя достигает (0,17–3,4) нм / с, и в зависимости от структуры материала мишени частота (частота (10–20) МГц обеспечивает максимальную скорость распыления), напряжение, ток и напряженность внешнего магнитного поля, Технологические скорости роста слоя снижаются из-за нагрева подложки в результате потока электронов. (при мощности 3 кВт температура подложки может быть повышена до 600°C).

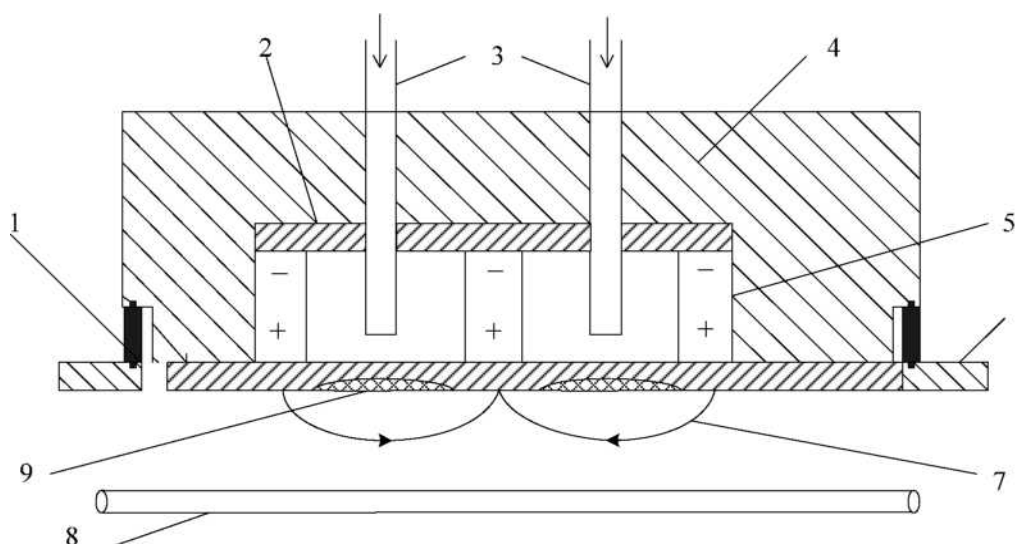


Рисунок 4.2. – Схема магнетронной системы ионного распыления с плоским катодом:

1 - изолятор; 2 - магнитопровод; 3 - система водоохлаждения; 4 - корпус катодного узла; 5 - постоянный магнит; 6 - стенка вакуумной камеры; 7 - силовые линии магнитного поля; 8 - кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 - зона эрозии распыляемого катода

Методы ионно-плазменного напыления позволяют получать соединения различной структуры на подложке. В зависимости от парциального давления в камеру вводятся активированные газы (азот, кислород, монооксид углерода, метан, диоксид серы и т. Д.) С соответствующим элементом или химическими соединениями (нитриды, оксиды, карбонаты, сульфиды и т. Д.). Этот метод распыления называется реактивным катодным распылением. В настоящее время процессы высокочастотного распыления используются не только для нанесения покрытия, но и для достижения определенного рельефа поверхности для селективного ионного травления.

Пленки TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 , ZrO_2 , Nb_2O_5 , TiN и многих других пленок собираются методом реактивного катодного распыления. Показатели преломления близки к монокристаллам этого материала, но имеют высокие значения, которые в значительной степени определяются режимами осаждения. На режим особенно влияет осаждение пленок TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 , причем эта зависимость значительно менее выражена в пленках ZrO_2 , Nb_2O_5 и SiO_2 . Для каждого металла - плотность

напряжения и тока, скорость роста пленки, состав остаточных газов, температура поверхности и т. Д. Выбран оптимальный режим, выбранный. Пленки, полученные при высоких температурах подложки (до 750 ° С для кварца), имеют самую высокую степень разрушения. индексы. Понижение температуры при 200 ° С приводит к снижению показателя преломления.

Способ реактивного катодного распыления может быть применен к смеси двух или более оксидов. Для этого используются мозаичные катоды из различных материалов или сплавов. Доминирующее испарение металла достигается выбором режима. Наилучшие результаты получены при использовании двух катодов, размещенных отдельно. Затем цель перемещается с одного катода на другой. Для осаждения таких пленок, как Si, SiO, SiO₂, требуется один кремниевый катод и изменение состава остаточного газа (Ar: Ar + O₂) и режимов осаждения.

Толщина напыленных слоев контролируется временем распыления или спектрофотометрическими методами. Однако его трудно использовать, поскольку катод непрозрачен и находится рядом с анодом. Проверка реальности возможна под достаточно широкими углами.

Преимущество метода катодного испарения заключается в получении тугоплавких металлоксидных пленок покрытий с высокой механической и химической стойкостью и хорошей адгезией пленок. В частности, пленки нитрида титана используются в качестве армирующих покрытий на режущих инструментах и протезах. Недостатками являются сложность изготовления больших катодов, сложность изготовления покрытий на крупных деталях, сложность контроля толщины пленок в процессе изготовления и скорость осаждения пленок [7].

4.2. Оксиды

Оксиды обладают высокой механической прочностью и химической стабильностью. Показатели преломления оксидов охватывают широкий спектр. Для покрытий с низким показателем преломления используются пленки SiO_2 и Si_2O_3 . Промежуточными значениями показателей преломления являются SiO , Al_2O_3 , MgO , ThO_2 , ZrO_2 и оксид редкоземельного элемента. CeO_2 и Ti имеют высокие показатели преломления.

Пленки Si лучше всего получают электронно-лучевым методом. Чтобы получить плотные и стабильные пленки, подложку необходимо нагреть до 150°C . Пленки SiO_2 также получают путем реактивного испарения SiO в ионизированном кислороде. Пленки SiO_2 прозрачны в диапазоне 0,9 мкм, $n = 1,46$ $\lambda = 550$ нм. Пленки, нанесенные на горячие поверхности, имеют высокую относительную плотность, хорошую адгезию и очень высокую химическую и механическую стабильность.

Пленки образуются при испарении оксида кремния в атмосфере кислорода. Эти пленки имеют показатель преломления 1,55 и поглощаются в УФ-области. Однако УФ-поглощение может быть устранено УФ-излучением.

Пленки SiO образуются, когда SiO испаряется без кислорода. Они поглощают в видимой области, но прозрачны в инфракрасном диапазоне до 8 микрон. Пленки SiO имеют показатель преломления ~ 2 в видимой области и $\sim 1,8$ в инфракрасном диапазоне. Пленки обладают высокой химической и механической стабильностью и являются отличным покрытием для серии IR.

Пленки Al_2O_3 получают только электронно-лучевым испарением. При тщательной подготовке пленки полоса пропускания составляет от 0,2 до 7 микрон. Пленки аморфны и имеют очень высокую твердость и адгезию. Показатель преломления пленок $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1.6$ в видимом диапазоне.

Пленки MgO могут быть получены электронно-лучевым испарением; Ширина

полосы таких пленок составляет от 0,22 до 8 мкм. Пленки имеют очень кристаллическую структуру; Размер кристаллита увеличивается с увеличением температуры подложки. При длительном контакте с воздухом пленки MgO покрываются мутным голубоватым рассеивающим покрытием. Поэтому пленки MgO нельзя использовать в качестве внешнего слоя в оптических покрытиях. Кроме того, пленки MgO не могли найти широкого применения из-за ограниченной стабильности.

ThO₂ испаряется электронным пучком. Пленки диоксида тория прозрачны в УФ-области и имеют показатель преломления в диапазоне от $n = 2,1$ при $\lambda = 0,2$ мкм до $n = 1,95$ при $\lambda = 0,3$ мкм. Пленки ThO₂ используются в сочетании с SiO₂ для многослойных покрытий в УФ-диапазоне и для увеличения отражения покрытий от Al. Он радиоактивен, поэтому следует соблюдать те же меры предосторожности, что и при работе с ThF₄.

Пленки Zr обычно получают электронно-лучевым испарением. Ширина полосы пропускания составляет около 0,34 ... 12 мкм. Показатель преломления пленок несколько зависит от температуры подложки (при комнатной температуре $n = 1,97$, $T_s = 200$ ° C, $n = 2,05$). Когда используется ZrO₂, существует проблема с образованием неоднородных пленок, возможно, из-за структурных дефектов. Пленки ZrO₂ имеют отличные механические и химические свойства и легко совместимы с другими оксидными пленками и MgF₂.

Оксиды редкоземельных элементов (La₂O₃, Pr₆O₁₁, Nd₂O₃, Sc₂O₃, Y₂O₃) образуют пленки с показателями преломления от 1,9 до 2,1. Они имеют большую прозрачность в видимой области и в ближней УФ области спектра. Все эти оксиды испаряются из вольфрамовых желобов. Реактивное испарение и высокая температура подложки увеличивают однородность и воспроизводимость свойств пленок. Все пленки обладают очень высокой стабильностью, кроме чувствительного к влаге La₂O₃. Sc₂O₃ и Y₂O₃ являются наиболее перспективными материалами, поскольку они сочетают высокую стабильность со средними значениями показателя преломления ($\sim 1,9$) в широкой полосе пропускания.

Пленки CeO_2 являются термостойкими и производятся электронно-лучевым испарением. Полоса пропускания простирается до 12 микрон от видимой области до инфракрасной области. Пленки CeO_2 , нанесенные на более нагретые поверхности, демонстрируют плохое поглощение в диапазоне 0,4-0,5 мкм. Толстые пленки сильно распространяют свет, что ограничивает их использование в ИК-диапазоне. Показатель преломления пленок CeO_2 в значительной степени зависит от температуры подложки. Пленки имеют поликристаллическую структуру при любой температуре.

Разница в показателях подложки и преломления обусловлена различными концентрациями границ зерен, поскольку повышенная температура подложки увеличивает размер кристаллитов и, следовательно, уменьшает влияние границ зерен. Пленки CeO_2 очень долговечны, прочны и высокая адгезия. Вместе с пленками MgF_2 или SiO_2 они используются в высокоотражающих многослойных покрытиях.

Пленки TiO_2 имеют твердую, высокую адгезию и химическую стойкость. Пленки TiO_2 высокого качества могут быть получены только путем реактивного испарения TiO . Пленки видны и прозрачны в инфракрасных зонах. Толстые пленки Ti демонстрируют рассеяние света около 3-х ближних в инфракрасном диапазоне, что ограничивает их использование в этом диапазоне. Показатель преломления пленок TiO_2 сильно зависит от температуры подложки (при изменении температуры, перехода от аморфных пленок к пленкам с анатазной или рутильной структурой) и условий осаждения: скорости конденсации и остаточного атмосферного давления. Таким образом, значения показателя преломления TiO_2 находятся в диапазоне от 1,9 до 2,6. Высокие растягивающие напряжения наблюдались в пленках Ti , полученных реактивным испарением в ионизированном кислороде. (3600-2200 кГ/см в зависимости от толщины пленки). Пленки TiO_2 применяются в интерференционных зеркалах обычно в комбинации с SiO_2 .

Достоинства и недостатки оксидных материалов приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1 - Достоинства и недостатки диэлектрических материалов для оптических применений.

Материал	Достоинства	Недостатки
Криолит Na_3AlF_6	Прозрачность и низкий коэффициент поглощения в области 0,2-14 мкм; самый низкий показатель преломления, что обеспечивает хороший коэффициент контрастности	Неоднородность показателя преломления $\approx 0,03$; зависимость относительной плотности пленки от температуры подложки; растворимость в воде; наличие растягивающих напряжений
MgF_2	Стабильность; твердость; хорошая адгезия	Неоднородность по толщине; наличие высоких растягивающих напряжений; несовместимость с пленками других веществ
ThF_4	Прозрачность в области 0,2-15 мкм; механическая и химическая стабильность; возможность получать очень толстые пленки; хорошая совместимость с пленками других веществ	Радиоактивность
LiF	Прозрачность в УФ-области; стабильность	Растворимость в воде
ZnS	Хорошая совместимость с фторидами и полупроводниками; высокая адгезия; широкая полоса пропускания; высокая относительная плотность	Сильная зависимость стабильности от предварительной обработки подложки
ZnSe	Высокий показатель преломления на 0,55 мкм	Поглощение в области до 0,46 мкм
Sb_2S_3	Высокий показатель преломления в красной части видимого диапазона	Сильное поглощение в коротковолновой области
SiO_2	Прозрачность в области 0,2-9 мкм; высокая относительная плотность; хорошая адгезия; очень высокая механическая и химическая стабильность	
Si_3O_4	Хорошая адгезия; очень	Поглощение в УФ-области

	высокая механическая и химическая стабильность	спектра
SiO	высокая механическая и химическая стабильность	Поглощение в видимой области
Al_2O_3	Очень высокая твердость и адгезия	Ограниченность выбора метода изготовления
MgO		Ограниченная стабильность; невозможность использования в качестве внешнего слоя
ThO ₂	Прозрачность в УФ-области	Радиоактивность
ZrO ₂	Прекрасные механические и химические свойства; совместимость с пленками других окислов	Неоднородность пленок
Оксиды элементов редких земель	Хорошая прозрачность в видимой и ближней УФ-области спектра; однородность пленок; воспроизводимость свойств; высокая стабильность; широкая полоса пропускания	La_2O_3 чувствителен к влаге
CeO ₂	Широкая полоса пропускания : от видимой области до ИК-диапазона вплоть до 12 мкм; высокая стабильность и твердость; хорошая адгезия	Сильное рассеяние света толстыми пленками; сильная зависимость показателя преломления от температуры подложки
TiO ₂	Твердость; хорошая адгезия; химическая стойкость; прозрачность в видимой и ближней ИК-областях	Ограниченность выбора метода изготовления; сильная зависимость показателя преломления от температуры подложки и условий конденсации; наличие растягивающих напряжений
Si	Твердость; устойчивость; высокий показатель преломления	Наличие поглощения
Ge	Высокая прозрачность начиная с 2 мкм; прочность; высокий показатель преломления; хорошая совместимость с другими пленками	Некоторая зависимость показателя преломления от условий нанесения пленки
Te	Высокий показатель преломления	Низкая механическая прочность

4.3. Оксид индия (In_2O_3)

4.3.1. Структурные свойства

Пленки In_2O_3 и ИТО (смеси оксидов индия и олова), которые напоминают массивные кристаллы, имеют объемно-центрированную кристаллическую решетку и состоят из преимущественно ориентированных шариков относительно направления $\langle 111 \rangle$ или $\langle 100 \rangle$. В разряде постоянного тока при постоянном токе пленки получают ионным распылением, в то время как параметры процесса высвобождения, такие как температура подложки, скорость распыления и парциальное давление кислорода, существенно влияют на ориентацию частиц. Существуют противоречивые данные о наличии в этих пленках фазы Sn, химического соединения. В пленках с ионным покрытием Boushel et al. В пленках, полученных растиранием с последующим пиролизом, фазу SnO_2 детектировали при концентрации Sn более 60% [80]. Однако Manifacer et al. Он не наблюдал фазу, состоящую из соединения Sn [8].

4.3.2. Электрические свойства

В пленках In_2O_3 удельное сопротивление, концентрации носителей и переносимость обычно равны $2 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $10^{19} \dots 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и $15 \dots 70 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$ соответственно. Для пленок, нанесенных последующим пиролизным порошком, оптимальное содержание атомов Sn составляет 10%, обеспечивая высокие значения электропроводности и оптической прозрачности. При более высоком содержании Sn удельная проводимость уменьшается из-за образования 2 кластеров в пленках In_2O_3 (SnO_2).

Механизм проводимости пленок In_2O_3 детально не изучен. В невырожденных пленках, полученных методом реактивного ионного распыления, механизм рассеяния основного носителя может рассеиваться до границ зерен. Некоторые авторы приводят данные о влиянии отжига в различных атмосферах на сопротивление пленок, нанесенных ионным всплеском. Изменения, наблюдаемые в этом размере, могут быть связаны с изменениями свойств частиц, а также с

расширением частиц, диффузией кислорода в пленку или экзофузией.

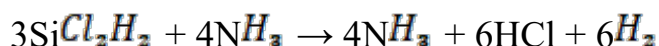
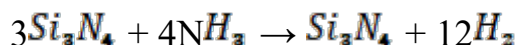
4.3.3. Оптические свойства

In₂O₃ имеет «непрямую» ограниченную зону 2,6 эВ и соответствует допустимым прямым оптическим переходам, энергиям 3,6 ... 3,85 эВ, по данным различных авторов. При изменении концентрации носителей n величина сдвига Бурштейна-Мосса изменяется пропорционально, что указывает на параболичность проводящей полосы. Значения эффективных масс носителей, определенные в соответствии с величиной этого сдвига, находятся в диапазоне от 0,25 до 0,45, а расчетные значения приведенной массы всегда превышают эффективную массу. электронов возможно с отрицательной кривизной валентной зоны. Пленки In₂O₃ легко соскребают кислотами [8].

4.4. Нитрид кремния

Идеальный стехиометрический нитрид кремния Si_3N_4 используется для пассивации полупроводников на кремниевых подложках. Выбор именно для этих целей Si_3N_4 обусловлен тем, что он представляет собой надежный барьер для диффузии молекул воды, ионов натрия, которые могут привести к коррозии металлизации ИС или к нестабильным эл. Характеристикам. Si_3N_4 также используют в качестве маски при локальном окислении, что обусловлено низкой скоростью окисления самого нитрида.

Химическое осаждение Si_3N_4 происходит за счет реакции между силаном и аммиаком, как правило в реакторах пониженного давления при $T=700...900$ °С.



Осаждение при пониженном давлении имеет преимущество в том, что мы получаем более равномерную и галогенную пленку за счет обеспечения диффузии компонент на подкладке. Скорость осаждения растет с ростом общего давления в системе при увеличении парциальных давлений компонент и уменьшается при

увеличении парциального давления амиака.

Si_3N_4 , химически осажденный при высоких T , представляет собой аморфный д/э. Атомы водорода в нем создают связи как с атомами азота, так и с атомами кремния. Количество связанного водорода зависит от температуры осаждения и соотношения реагентов в газовой фазе. Большая концентрация водорода в пленках наблюдается при низкой температуре осаждения и более высокой концентрации амиака в парогазовой смеси. Si_3N_4 , осажденный при низких значениях соотношения концентраций амиака к дихлорсилану в газовой фазе, поддерживает повышенную концентрацию атомов кремния, что ухудшает д/э свойства пленок. Коэффициент преломления $Si_3N_4 = 2,01$, а скорость травления в разбавленном растворе плавиковой кислоты менее 1 нм/мин. Оба этих параметра используются для определения качества осаждаемых пленок. В пленках Si_3N_4 присутствуют чрезвычайно большие напряжения растяжения (≈ 100 ГПа), поэтому толстые пленки Si_3N_4 могут растрескиваться.

4.5. Спектральные характеристики пленок оксида титана и олова

На основе прозрачных проводящих оксидов металлов (TCO), таких как SnO_2 , In_2O_3 , TiO_2 и ITO, известно, что структуры полупроводник-изолятор-полупроводник (PDP) используются для преобразования солнечной энергии в электрическую энергию. В таких структурах кремний и полупроводниковые соединения A3B5, такие как фосфит индия, в основном используются в качестве поглощающих солнце материалов. Слои TSO являются не только фотоэлектрическими, но и компонентами фотоэлектрохимических элементов, в которых они играют защитную роль против коррозии основного полупроводникового материала. В дополнение к функции немедленного предотвращения коррозии широкий диапазон оксидных слоев способствует расширению спектральной характеристики fotocувствительности за счет уменьшения поверхностной рекомбинации в узкополосном абсорбирующем материале. Кроме того, слои SnO_2 и TiO_2 могут быть успешно использованы в

солнечных элементах на основе Si и InP в качестве антибликового покрытия благодаря соответствующим значениям показателей прозрачности и преломления в видимой области спектра ($n = 2,0$ и $n = 1$, 72-2.60 соответственно). преобразование солнечной энергии в электрическую повышает эффективность [9].

Свойства полупроводниковых пленок и структур в значительной степени определяются технологией их изготовления, но в известной литературе мало исследований, в которых свойства этих материалов оцениваются в зависимости от условий фотокроссовых свойств. производство. В данной статье описывается технология исследования структурных, оптических и фотоотражательных свойств, а также слоев и гетерогенных структур на основе SnO₂ и TiO₂. Метод пиролитического напыления, используемый для получения слоев и структур, очень прост и экономичен, не требует сложного оборудования и может быть успешно использован для производства эффективных фотоэлектрических преобразователей.

Оптические свойства пленок и гетеропереходов

Спектры проницаемости изучались на полученных слоях SnO₂ и TiO₂. На рис. На рисунке 4.3 показаны такие спектры для слоев SnO₂, нанесенных на стеклянные подложки. Прозрачность несвязанных слоев в этой области длин волн достигает 85% и уменьшается до 53% для слоев, легированных сурьмой. Наблюдаемая интерференционная картина позволяет оценить толщину D пленок SnO₂ по известному выражению:

$$D = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot 2n ,$$

(2), где λ_1, λ_2 - Длины волн ближайших максимумов или минимумов n представляют собой показатель преломления для SnO₂, равный 2 на длине волны 550 нм. Полученные таким образом значения толщины слоев SnO₂ составляют 330 нм для развернутой пленки и 200 нм для легированной пленки.

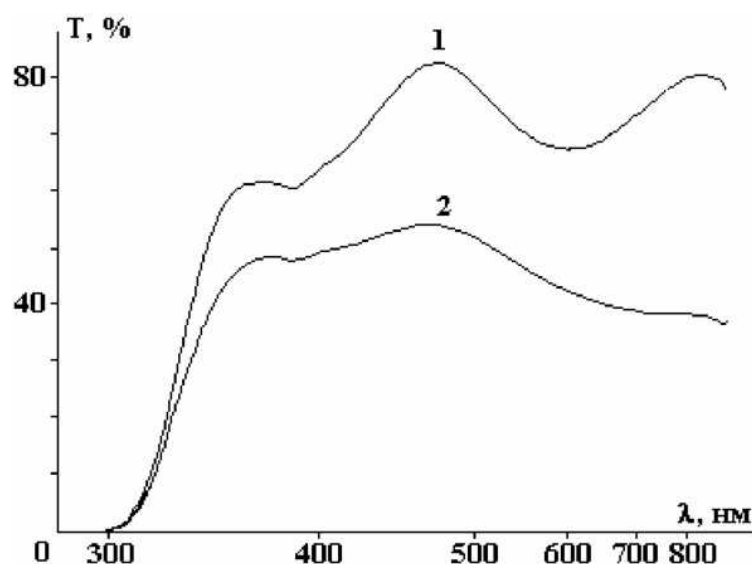


Рисунок 4.3. – Спектры пропускания пленки SnO_2 , нелегированной (1) и легированной Sb (2)

Соответствующие спектры, нанесенные на кварцевые и сапфировые подложки, отличаются более мягким уменьшением прозрачности в области коротких волн. Граница полосы пропускания составляет 4,96 эВ и не зависит от нее. состояние природы субстрата. Эти результаты позволили определить ширину запрещенной зоны SnO_2 , равную 4,7 эВ.

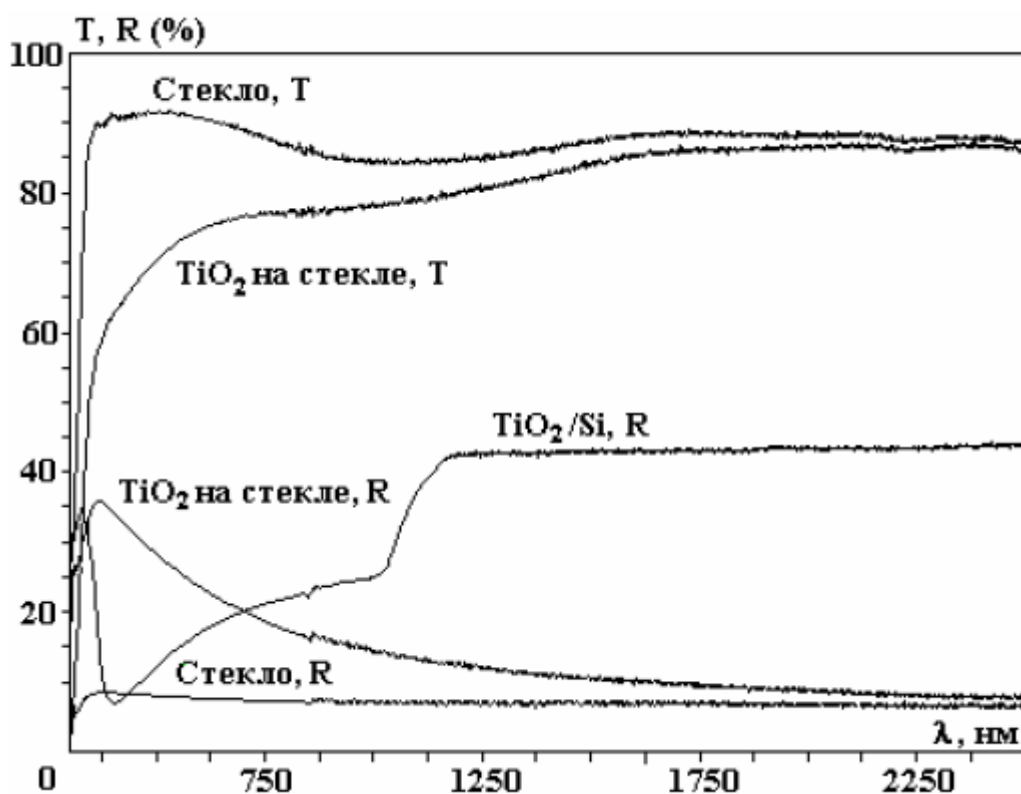
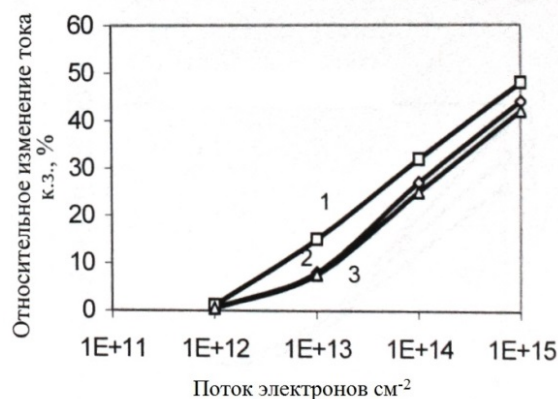
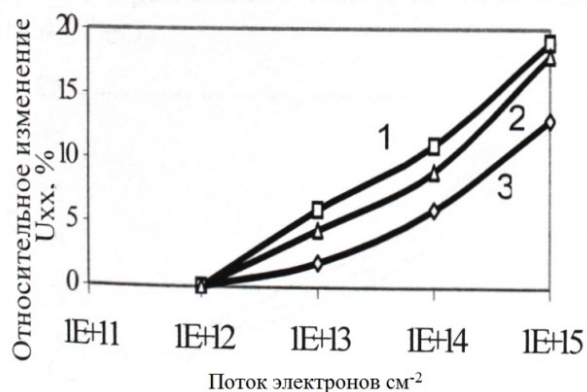


Рисунок 4.4. – Спектральное распределение коэффициентов пропускания T и отражения R пленок оксида титана на стекле и кремнии.

Спектральное распределение коэффициентов пропускания и отражения в пленках TiO_2 , нанесенных на стекло и кремний, показано на рис. 4.4. При $\lambda = 425$ нм наблюдается максимальное значение коэффициента отражения, равное 35%. С увеличением длины волны коэффициент отражения монотонно уменьшается до 10% [9].

РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

5.1. Имитация радиационной обстановки соответственных поясов Земли на параметры ФЭП.



Была проведена имитация радиационной обстановки соответственных поясов Земли, а также солнечные вспышки в широком диапазоне доз ($\Phi = 3 \cdot 10^{11} - 10^{15}$ частиц/см²), соответствующих времени эксплуатации солнечных батарей в течении 1 – 15 лет для орбит в интервале высот 670 – 36000 км. Облучение фрагментов БФ проводились на Киевском изохронном циклотроне У – 240 Института ядерных исследований АНУ.

(а)

(б)

Рисунок 5.1 – Относительное изменение напряжения холостого хода (а) и тока короткого замыкания (б) при воздействии потока электрона мощностью 3МэВ для ФЭП с различным типом просветляющего покрытия: 1 - ITO, 2 - CeO₂, 3 - Si₃N₄.

Результаты испытаний ФЭП со структурой $n-p-p^+$, которые отличались типом просветляющего покрытия и не имели защиту из кварцевого стекла, на воздействие потоков высокоэнергетических электронов разной дозы и энергий представлены на рис. 5.2 – 5.4. Полученные результаты подтверждают радиационную стойкость покрытий на основе CeO₂ и Si₃N₄. При защите кварцевым стеклом степень

деградации эффективности снижается и не превышает 5,5 – 6%, что меньше по сравнению с известными аналогами – 7 – 8%.

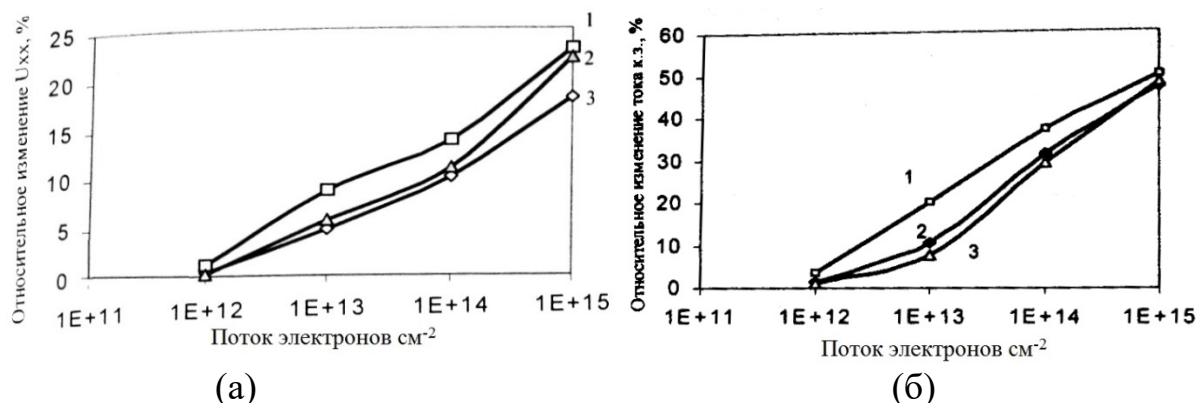


Рисунок 5.2 – Относительное изменение напряжения холостого хода (а) и тока короткого замыкания (б) при воздействии потока электрона мощностью 4,5 МэВ для ФЭП с различным типом просветляющего покрытия: 1 – ITO, 2 – Si_3N_4 , 3 – CeO_2 .

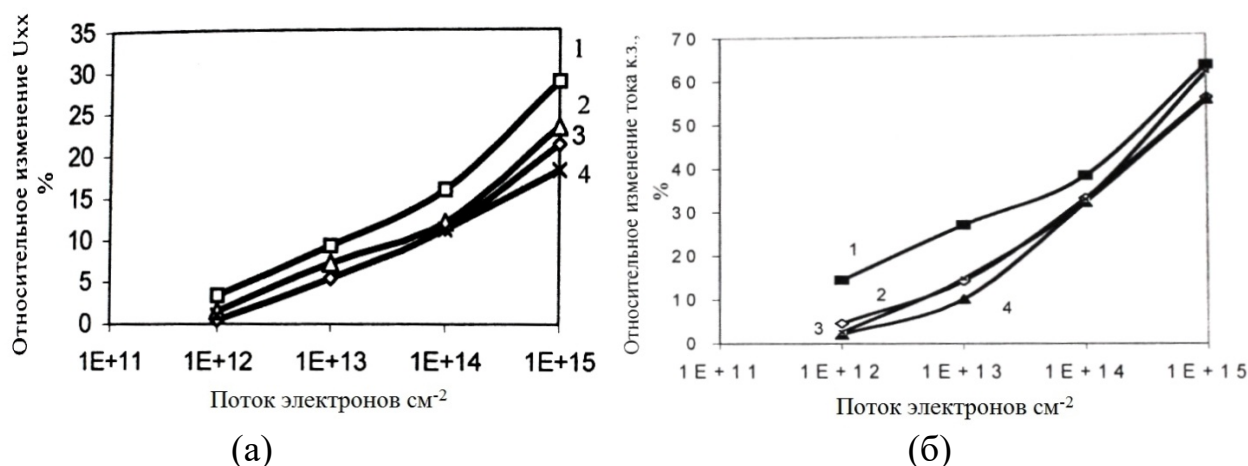
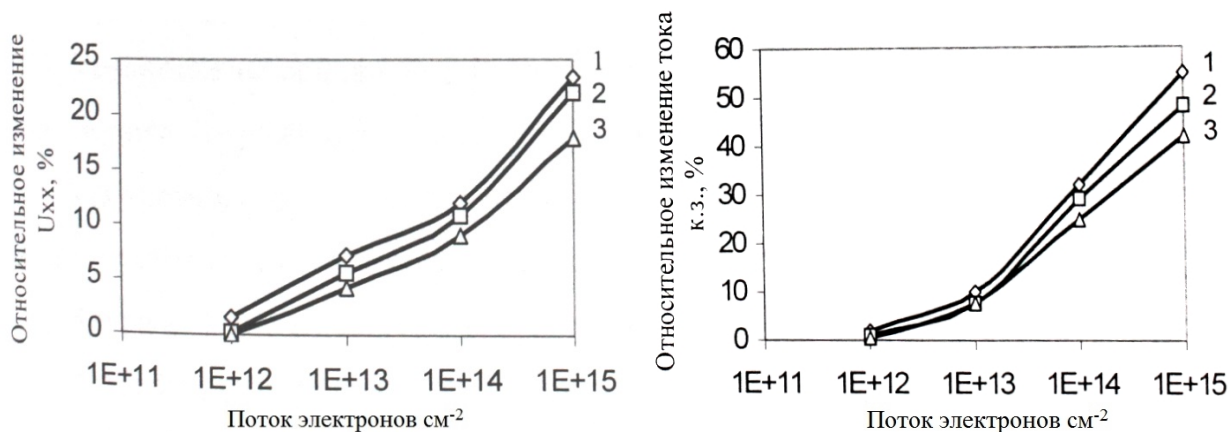


Рисунок 5.3 – Относительное изменение напряжения холостого хода (а) и тока короткого замыкания (б) при воздействии потока электрона мощностью 6 МэВ для ФЭП с различным типом просветляющего покрытия: 1 – ITO, 2 – Si_3N_4 , 3 – TiO_2 , 4 – CeO_2 .



(а)

(б)

Рисунок 5.4 – Относительное изменение напряжения холостого хода (а) и тока короткого замыкания (б) при воздействии потока электрона мощностью 6 МэВ для ФЭП с CeO_2 : 1 – 6 МэВ, 2 – 6 МэВ, 3 – 3 МэВ.

5.2. Воздействие потоков электронов на ВАХ ФЭП.

Было исследовано действие защитных просветляющих покрытий Si_3N_4 , TiO_2 , CeO_2 и ИТО на кремниевый фотоэлектрический преобразователь площадью $32 \times 32 \text{ мм}^2$. Структура была получена на подложках $p\text{-Si}$ с объемным сопротивлением $8 - 9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и толщиной 180 мкм . Тесты облучения были сделаны на ускорителе электронов Mikrotron M30. Измерения характеристик кремниевых ФЭП были осуществлены до и после облучения при комнатной температуре на симуляторе солнца с AM0 спектром. В таблице 5.1 содержатся результаты облученных кремниевых ФЭП. Образцы подверглись облучению электронами с энергией 7 MeV и плотностью потока $3,34 \cdot 10^{12} \text{ electron / см}^2$ та $1,67 \cdot 10^{12} \text{ electron / см}^2$ - эквивалент пребывания на низкой околоземной орбите ($400 - 800 \text{ км}$) 3 и 1,5 года соответственно. На рисунках 5.5 – 5.8 приведены вольтамперные характеристики кремниевых ФЭП с соответствующим ПП.

5.1. Таблица измеренных значений параметров ФЭП

Образец	Энергия электрон в, MeV	Плотность облучения, электрон/см ²	Эквивалент пробы в на 400- 800 км	Параметры элементов перед облучения		Параметры элементов после облучения	
				U _{хх} , В	I _{кз} , А	U _{хх} , В	I _{кз} , А
ИТО	7	$3,34 \cdot 10^{12}$	3 года	0,614	0,415	0,595	0,384
	7	$1,67 \cdot 10^{12}$	1,5 лет	0,611	0,413	0,600	0,396
Si_3N_4	7	$3,34 \cdot 10^{12}$	3 года	0,608	0,371	0,589	0,345
	7	$1,67 \cdot 10^{12}$	1,5 лет	0,610	0,375	0,597	0,363
CeO_2	7	$3,34 \cdot 10^{12}$	3 года	0,605	0,382	0,594	0,362
	7	$1,67 \cdot 10^{12}$	1,5 лет	0,609	0,385	0,603	0,377

TiO ₂	7	$3,34 \cdot 10^{12}$	3 года	0,612	0,361	0,598	0,328
	7	$1,67 \cdot 10^{12}$	1,5 лет	0,609	0,358	0,609	0,347

С полученных данных видно, что наилучшим выбором ПП для космического фотоэлектрического преобразователя является пленки CeO₂.

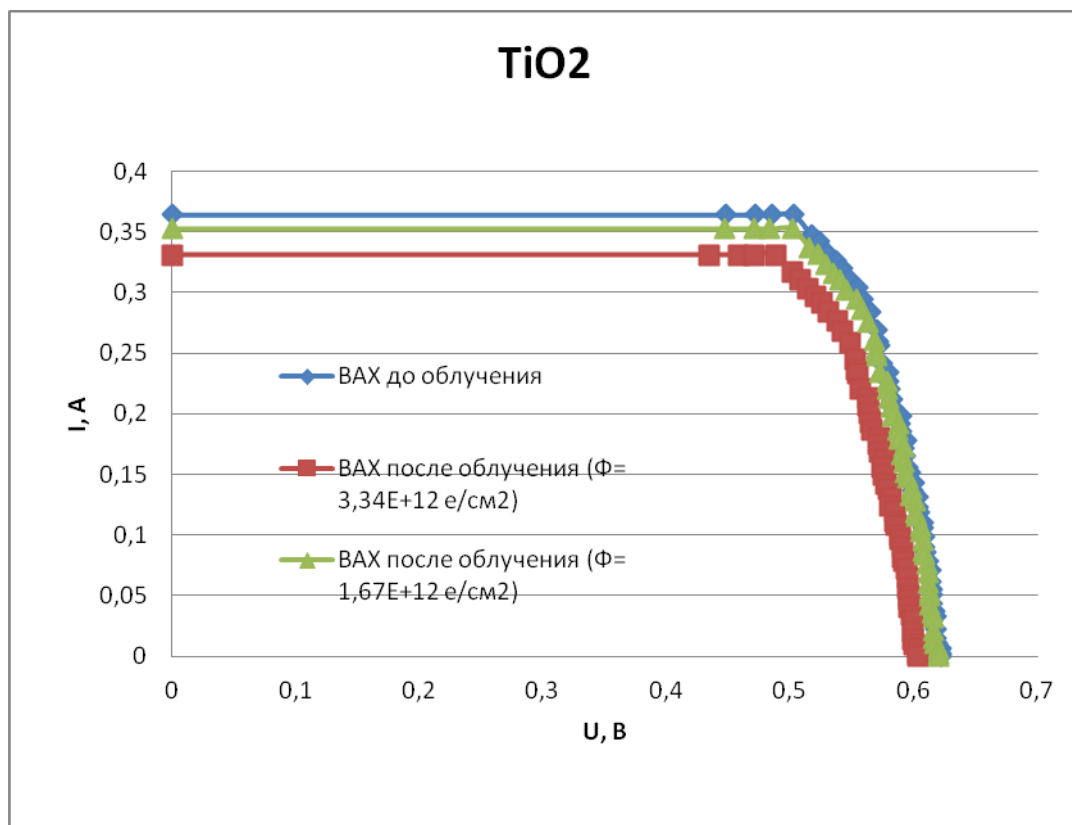


Рисунок 5.5 – Вольтамперная характеристика ФЭП с ПП TiO₂

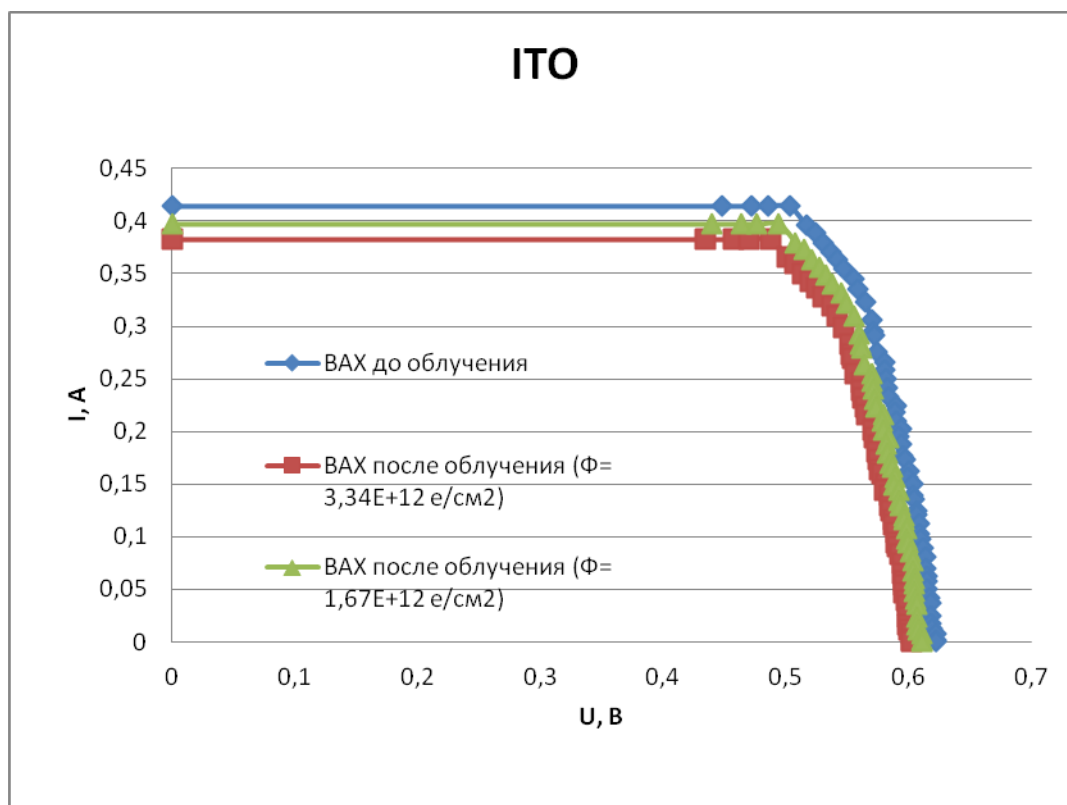


Рисунок 5.6. – Вольтамперная характеристика ФЭП с ПП ITO

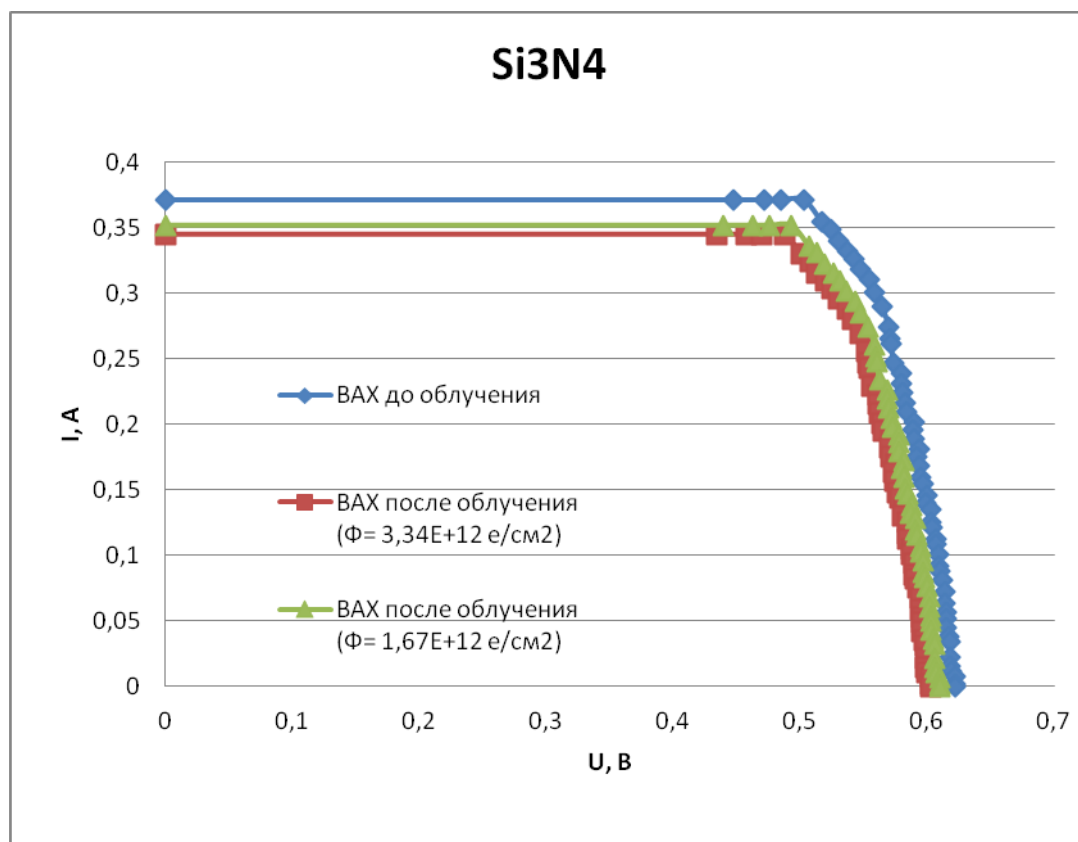


Рисунок 5.7. – Вольтамперная характеристика ФЭП с ПП Si₃N₄

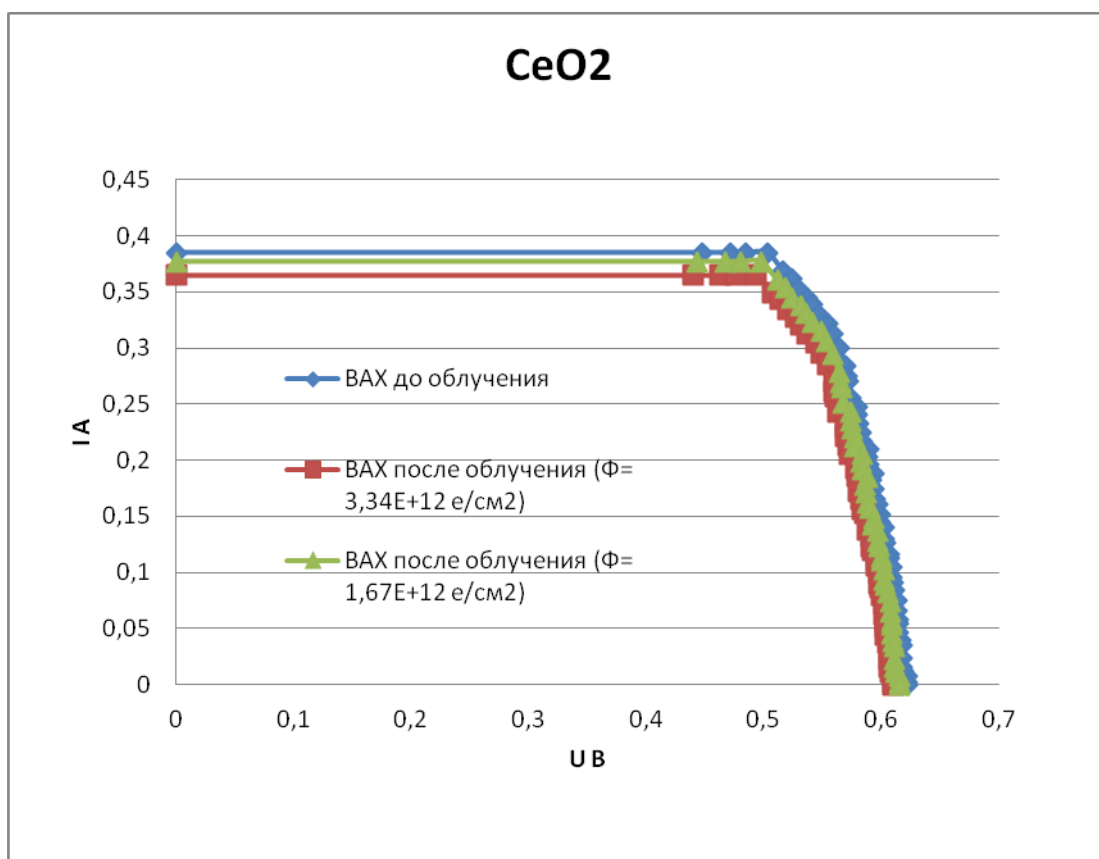


Рисунок 5.8 – Вольтамперная характеристика ФЭП с ПП CeO_2

Выводы

Как следует из полученных результатов, при помощи однослойных антиотражающих покрытий из Si_3N_4 , CeO_2 , TiO_2 и ITO можно существенно снизить отражение от поверхности солнечных элементов, что в свою очередь может привести к повышению их КПД.

При испытаниях на воздействие потока электронов с энергией 7 МэВ, что эквивалентно времени пребывания в космическом пространстве – три года на низких орбитах (600 – 800 км) в соответствии с методикой испытаний НКУ, солнечные элементы с КПД 16 – 17 % с защитным покрытием ITO деградировали по основным параметрам на 5 – 6 %, а с защитным покрытием из нитрид кремния – на 9 – 10 %, что является очень хорошим результатом.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследования, проведенные в данной дипломной работе, ставили целью изучить свойства защитных и просветляющих покрытий для кремниевых фотоэлектрических преобразователей космического назначения повышенной радиационной стойкости в условиях реальных и доступных в Украине технологий. Из всех возможных вариантов в качестве защитных покрытий выбрано два типа: нитрид кремния и ITO.
2. При испытаниях на воздействие потока электронов с энергией 7 МэВ, что эквивалентно времени пребывания в космическом пространстве – три года на низких орбитах (600 – 800 км) в соответствии с методикой испытаний НКУ, солнечные элементы с КПД 16 – 17 % с защитным покрытием ITO деградировали по основным параметрам на 5 – 6 %, а с защитным покрытием из нитрид кремния – на 9 – 10 %. Такие результаты можно считать очень хорошими и сравнимыми с лучшими результатами, достигнутым зарубежными фирмами на кремниевых фотоэлектрических преобразователях. К преимуществу пленок нитрида кремния в сравнении с ITO можно отнести их более высокую доступность и воспроизводимость технологии.
3. По совокупности всех исследований можно, однако, сделать вывод, что именно пленки ITO – идеальный материал для защитных покрытий фотоэлектрических преобразователей космического назначения повышенной радиационной стойкости, поскольку они обладают низким коэффициентом отражения, а также решают сразу две задачи: нанесение антиотражающего покрытия и формирование токосъемных контактов.
4. Результаты работы могут быть использованны для дальнейшего усовершенствования конструкций кремниевых ФЭП с целью уменьшения деградации солнечных элементов в космическом пространстве и увеличения коэффициента полезного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Летин, В.А. Защитные покрытия солнечных батарей космических аппаратов с большим ресурсом / В.А. Летин, Л.С. Гаценко, Т.А. Агеева. // Автономная энергетика : технический прогресс и экономика, № 24-25. – 2008-2009. – С. 3-13.
2. Фаренбрух ,А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб . - М., Энергоатомиздат, 1987 г. — 280 с. Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна.
3. Кожем'яко, В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В. П. Кожем'яко, В. Г. Домбровський, В. Ф. Жердецький, В. І. Маліновський, Г. В. Притуляк // Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях
4. Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. - Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360 с.
5. Акишин, А.И. Космическое материаловедение / А.И. Акишин. - М.: НИИЯФ МГУ, 2007. - 209 с.
6. Кривобоков, В.П. Плазменные покрытия (свойства и применение) : учебное пособие / В.П. Кривобоков. - Учебное пособие. - Томск, ТПУ, 2011. - 137 с.
7. Котликов, Н.Е. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий : учебное пособие / Е.Н.Котликов, Г.А.Варфоломеев, Н.П. Лавровская, А.Н.Тропин, Е.В.Хонинева. – Учебное пособие. – СПб, ГУАП, 2010. – 181 с.
8. Чопра, К. Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас. - М.: Мир, 1986 г. — 438 с.
9. Берсирова, О.Л. ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСИДОВ ТИТАНА И ОЛОВА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ ПУЛЬВЕРИЗАЦИЕЙ: ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА / О.Л. Берсирова, Л.И.

- Брук, А.И. Дикусар, М.И. Караман, С.П. Сидельникова, А.В. Симашкевич, Д.А. Шербан, Ю.С. Японцева // Институт прикладной физики АН Молдовы. – 2012
10. Колтун, М.М.- Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.: Мир, 1985. – 280 с.
11. Getman, A.V. Influence of the carrier lifetime on the silicon solar cells radiation resistance / A.V. Getman, M.G. Dushejko, A.V. Ivashchuk, M.S. Fadieiev, Y.I. Yakymenko // International Conference on Electronics and Nanotechnology. – 2014.
12. Оганесян, А.С. ОДНОСЛОЙНЫЕ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СаАз / А.С. Оганесян // Известия НАН Армении, Физика, т.43, №3, с.211-215 (2008)
13. Новиков, Л.С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов / Л.С. Новиков. - М.: Университетская книга, 2010. — 192 с.